

---

# **DIPLOMARBEIT**

---

Herr  
**Simon Johann Munter**

**Möglichkeiten zur Effizienz-  
steigerung moderner PKWs**

Mittweida, 2018



# **DIPLOMARBEIT**

---

## **Möglichkeiten zur Effizienz- steigerung moderner PKWs**

Autor:

**Herr**

**Simon Johann Munter**

Studiengang:

**Wirtschaftsingenieurwesen**

Seminargruppe:

**KW14wIA**

Erstprüfer:

**Prof. Dr. rer. oec. Volker Tolkmitt**

Zweitprüfer:

**Prof. Dr. rer. oec. Serge Velesco**

Einreichung:

**Mittweida, 01.05.2018**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2018**

# **DIPLOMTHESIS**

---

## **Capabilities to increase the efficiency of modern passenger cars**

author:

**Mr.**

**Simon Johann Munter**

course of studies:

**Industrial Engineering**

seminar group:

**KW14wIA**

first examiner:

**Prof. Dr. rer. oec. Volker Tolkmitt**

second examiner:

**Prof. Dr. rer. oec. Serge Velesco**

submission:

**Mittweida, 01.05.2018**

defence/ evaluation:

**Mittweida, 2018**



## **Bibliografische Beschreibung:**

Munter, Simon Johann:

Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung moderner PKWs. - 2018. - IX, 65 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen, Diplomarbeit, 2018

## **Referat:**

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit den technischen Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung moderner PKWs. Hierbei wird Einblick gegeben in den Karosseriebau, die Motorentechnik als auch Hybride Antriebskonzepte. Alle Abschnitte, und deren Unterkapitel, werden aus technischer Sicht erläutert, Vor- als auch Nachteile aufgezeigt sowie wirtschaftliche Aspekte, welche die Anspruchsgruppen Hersteller und Kunden betreffen, diskutiert. Es soll veranschaulicht werden, dass die Effizienzsteigerungsmöglichkeiten von PKWs mit konventionellen Verbrennungsmotoren erschöpft sind und, dass selbige von Fahrzeugen mit Hybridantrieben verdrängt werden - folglich stellen letztere eine Brückentechnologie zur Elektromobilität dar. Abschließend werden ein Rückblick über die gewonnen Erkenntnisse gegeben, sowie Prognosen als auch Zukunftsvisionen für die Mobilität von morgen vorgestellt.

# Inhalt

<b>Inhalt .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	2
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Methodisches Vorgehen.....	4
<b>2 Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung moderner PKWs .....</b>	<b>5</b>
2.1 Karosseriebau.....	5
2.1.1 Historie.....	5
2.1.2 Leichtbau .....	6
2.1.2.1 Grundlagen.....	6
2.1.2.2 Werkstoffe im Karosseriebau .....	7
2.1.3 Aerodynamik.....	11
2.1.3.1 Grundlagen der Aerodynamik .....	12
2.1.3.2 Maßnahmen zur Verbesserung der Aerodynamik.....	13
2.1.4 Wirtschaftliche Aspekte des Karosseriebaus.....	16
2.2 Motorentechnik.....	17
2.2.1 Funktionsprinzip eines Verbrennungsmotors.....	17
2.2.1.1 Wichtige Bauteile eines Verbrennungsmotors.....	18
2.2.1.2 Arbeitszyklen eines Verbrennungsmotors.....	19
2.2.2 Downsizing.....	21
2.2.2.1 Grundlagen.....	21
2.2.2.2 Vorteile und Nachteile des Downsizings .....	22
2.2.3 Turbotechnologie .....	23
2.2.3.1 Grundlagen und Funktionsprinzip von Turbokompressoren .....	23
2.2.3.2 Aufladung mit mehreren Turboladern.....	27

2.2.3.3	Variable Turbinen Geometrie (VTG) Turbolader .....	28
2.2.3.4	Elektrische Turbolader .....	29
2.2.3.5	Vorteile und Nachteile von Turboaufladungen .....	30
2.2.4	Direkteinspritzung .....	30
2.2.4.1	Grundlagen und Funktionsprinzip der Direkteinspritzung .....	30
2.2.4.2	Direkteinspritzung im Vergleich zu Saugrohreinspritzung .....	33
2.2.4.3	Vorteile und Nachteile der Direkteinspritzung .....	34
2.2.5	Variable Nockenwellenverstellung.....	34
2.2.5.1	Funktionsprinzip variabler Nockenwellenverstellungen .....	35
2.2.5.2	Vorteile und Nachteile von variablen Nockenwellenverstellungen	36
2.2.6	Zylinderabschaltung .....	36
2.2.6.1	Wirkungsweise der Zylinderabschaltung.....	37
2.2.6.2	Vorteile und Nachteile der Zylinderabschaltung .....	39
2.2.7	Wirtschaftliche Aspekte der Motorentchnik.....	40
2.3	<i>Hybride Antriebskonzepte</i> .....	41
2.3.1	Geschichtliche Entwicklung und Definition .....	42
2.3.2	Konzepte und Betriebsweisen .....	43
2.3.2.1	Serielle Hybridantriebe .....	44
2.3.2.2	Parallele Hybridantrieb .....	46
2.3.2.3	Leistungsverzweigte Hybridantriebe .....	49
2.3.3	Einsatzstrategien und Funktionsprinzipien .....	49
2.3.3.1	Start-Stopp Automatik.....	50
2.3.3.2	Boosten .....	51
2.3.3.3	Mild-Hybrid .....	51
2.3.3.4	Voll-Hybrid .....	51
2.3.3.5	Plug-in Hybrid .....	51
2.3.4	Vorteile und Probleme von Hybridantrieben .....	52
2.3.5	Wirtschaftliche Aspekte hybrider Antriebskonzepte .....	53
<b>3</b>	<b>Schluss</b> .....	<b>55</b>
3.1	<i>Ergebnisse</i> .....	55
3.2	<i>Prognosen und Zukunftsvision</i> .....	59
	<b>Literatur</b> .....	<b>66</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b> .....	<b>72</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung der energiebedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen weltweit nach Sektor im Jahr 2015.....	2
Abbildung 2: Werkstoffzusammensetzung eines BMW 7er .....	7
Abbildung 3: Vergleich Stahlblech und Stahl- Dünnwandguss .....	8
Abbildung 4: Gewichtsspezifischer Eigenschaftsvergleich von Werkstoffen .....	10
Abbildung 5: Zusammenhang Gewicht und Gesamtkosten .....	11
Abbildung 6: Geschwindigkeitsabhängiger Verlauf der Fahrkräfte .....	13
Abbildung 7: Offene Jalousie (links) für Kühlwirkung, geschlossene Jalousie (rechts) für verringerten cw-Wert.....	14
Abbildung 8: Zusammenhang Öffnungswinkel der Kühlerjalousie und cw-Wert .....	14
Abbildung 9: Unterbodenverkleidungen Audi R8.....	15
Abbildung 10: Hauptbestandteile eines Kolbenmotors .....	19
Abbildung 11: Arbeitszyklus eines Verbrennungsmotors.....	20
Abbildung 12: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Motorleistung .....	22
Abbildung 13: Schematische Darstellung einer mechanischen Aufladung .....	24
Abbildung 14: Schematische Darstellung einer thermodynamischen Aufladung mit ATL ..	24
Abbildung 15: Schnittdarstellung ATL .....	25
Abbildung 16: Wastegateregulung (links) und VTG Regulung (rechts).....	26
Abbildung 17: Querschnittsverengung bei VTG ATL (Düsenwirkung) .....	29
Abbildung 18: Leistungsdiagramm 300 SL (Vergaserbetrieb/Direkteinspritzung) .....	31
Abbildung 19: Lage der Einspritzventile .....	32

---

Abbildung 20: Aufbau Hochdruck-Einspritzventil.....	33
Abbildung 21: Vergleich Saugrohreinspritzung zu Direkteinspritzung.....	33
Abbildung 22: Hydraulische Verstellung der Nockenwelle (links) - Einbaulage Nockenwellenverstellung (rechts) .....	35
Abbildung 23: Aktivierte und deaktivierte Zylinder bei der Zylinderabschaltung.....	37
Abbildung 24: Motorkennfeld mit ZAS.....	38
Abbildung 25: Entwicklung der Rohöl- sowie Treibstoffpreise seit 1950.....	42
Abbildung 26: Aufbau Serieller Hybridantrieb.....	44
Abbildung 27: Aufbau Paralleler Hybridantrieb.....	46
Abbildung 28: Aufbau Leistungsverzweigter Hybridantrieb .....	49
Abbildung 29: Hybridisierungsgrade .....	50
Abbildung 30: Nicht-regenerativer Energieaufwand eines Mittelklasse PKW .....	62
Abbildung 31: Lebensweganalyse der CO2 Emissionen eines Mittelklasse PKW .....	63
Abbildung 32: Lebensweganalyse der CO2 Emissionen eines Mittelklasse PKW im Vergleich.....	64
Abbildung 33: CO2 Emissionen bei der Stromerzeugung verschiedener Länder .....	65

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich Aluminium und Stahl.....	9
Tabelle 2: Eigenschaften der Hybridsysteme .....	43
Tabelle 3: Varianten von Parallelhybriden.....	47
Tabelle 4: Ergebnisse im Überblick.....	57

# Abkürzungsverzeichnis

Alle in Abkürzungen in [eckigen Klammern] sind Maßeinheiten z.B. [km/h]

<b>a</b>	Beschleunigung (acceleration); Einheit [ $\text{m/s}^2$ ]
<b><math>\alpha</math></b>	Kurbelwinkel; Einheit [ $^\circ$ ]
<b>Abb.</b>	Abbildung
<b><math>A_p</math></b>	Anströmquerschnitt; Einheit [ $\text{m}^2$ ]
<b>ASF</b>	Aluminium Space Frame
<b>ATL</b>	Abgasturbolader
<b>[bar]</b>	Bar; Druckeinheit
<b>bzw.</b>	beziehungsweise
<b>ca.</b>	circa
<b>CFK</b>	Carbonfaserverstärkter bzw. Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
<b><math>\text{CO}_2</math></b>	Kohlendioxid
<b><math>c_w</math></b>	Luftwiderstandsbeiwert; Einheit [-]
<b>d.h.</b>	das heißt
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>F</b>	Kraft (Force); Einheit [N]
<b><math>F_w</math></b>	Luftwiderstandskraft; Einheit [N]
<b>[g]</b>	Gramm; Masseneinheit
<b>GFK</b>	Glasfaserverstärkter Kunststoff
<b>Hrsg.</b>	Herausgeber
<b>i.d.R.</b>	in der Regel
<b>inkl.</b>	inklusive
<b>Kfz</b>	Kraftfahrzeug



---

<b>[kg]</b>	Kilogramm (1000 Gramm); Masseneinheit
<b>[km]</b>	Kilometer (1000 Meter); Längeneinheit
<b>[km/h]</b>	Kilometer pro Stunde; Geschwindigkeitseinheit
<b>[kW]</b>	Kilowatt (1000 Watt); Leistungseinheit
<b>m</b>	Masse; Einheit [kg]
<b>[m]</b>	Meter; Längeneinheit
<b>[m<sup>2</sup>]</b>	Quadratmeter; Flächeneinheit
<b>M</b>	Drehmoment; Einheit [Nm]
<b>max.</b>	maximal
<b>[min]</b>	Minute; Zeiteinheit
<b>Mio.</b>	Million
<b>[mm]</b>	Millimeter (0,001 m); Längeneinheit
<b>[mm<sup>3</sup>]</b>	Kubikmillimeter; Volumeneinheit
<b>Mrd.</b>	Milliarde
<b>[m/s]</b>	Meter pro Sekunde; Geschwindigkeitseinheit
<b>[m/s<sup>2</sup>]</b>	Meter pro Sekunde zum Quadrat; Beschleunigungseinheit
<b>n</b>	Drehzahl; Einheit [U/min]
<b>[N]</b>	Newton; Krafteinheit
<b>P</b>	Leistung (Power); Einheit [W]
<b>PKW</b>	Personenkraftwagen
<b>PS</b>	Pferdestärke; Leistungseinheit 1 kW = 1,36 PS
<b>r</b>	Radius; Einheit [m]
<b>[rad/s]</b>	Radian pro Sekunde; Einheit für Winkelgeschwindigkeit
<b><math>\rho_L</math></b>	Luftdichte; Einheit [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>[s]</b>	Sekunde; Zeiteinheit
<b>s</b>	Kolbenhub
<b>S.</b>	Seite

---

<b>SUV</b>	Sports Utility Vehicle
<b>[U/min]</b>	Umdrehungen pro Minute; Einheit für Drehzahl
<b>usw.</b>	und so weiter
<b>u.U.</b>	unter Umständen
<b>v</b>	Geschwindigkeit, velocity; Einheit [m/s bzw. km/h]
<b>V<sub>c</sub></b>	Kompressionsvolumen; Einheit [mm <sup>3</sup> ]
<b>Vgl.</b>	Vergleiche
<b>V<sub>h</sub></b>	Hubvolumen; Einheit [mm <sup>3</sup> ]
<b>ω</b>	Winkelgeschwindigkeit; Einheit [rad/s]
<b>[W]</b>	Watt; Leistungseinheit
<b>ZAS</b>	Zylinderabschaltung
<b>z.B.</b>	zum Beispiel

# 1 Einleitung

„Erstmals seit drei Jahren verzeichnet der Forscherverbund Global Carbon Project wieder einen Anstieg der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen und der Industrie. Seit dem Jahr 2014 war der CO<sub>2</sub>-Ausstoß kaum mehr gestiegen. Im vergangenen Jahr schreiben Forscher desselben Verbundes, die Trendwende könne möglicherweise geschafft sein. Doch das laufende Jahr 2017 macht diese Hoffnung zunichte: Für dieses Jahr erwarten die Wissenschaftler ein Wachstum von etwa zwei Prozent.“<sup>1</sup>

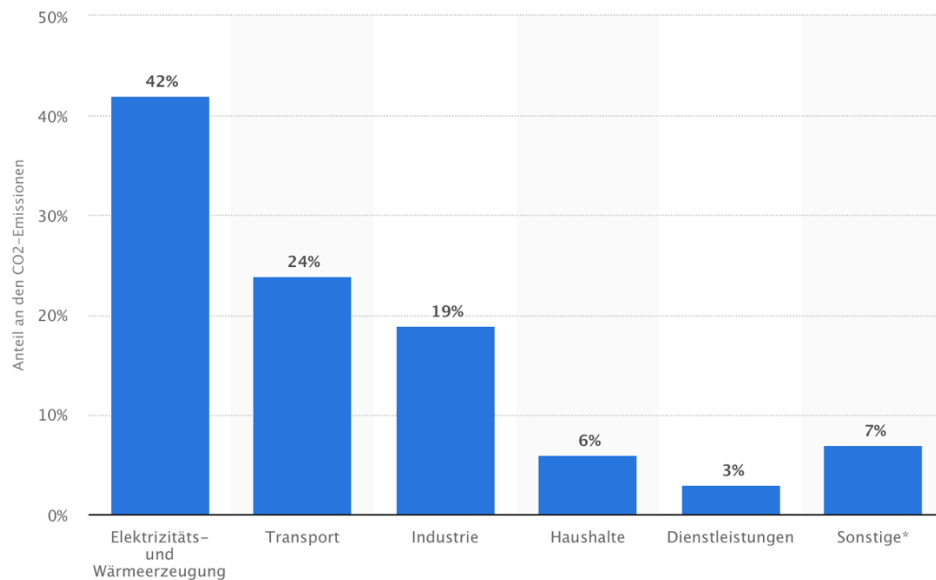
Trotz unserer Anstrengungen zum Umweltschutz und der Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen besteht dringend Handlungsbedarf zur Erhaltung unseres Ökosystems zugunsten unserer Folgegenerationen. Hierbei rückt zwangsläufig, neben den Kraftwerks- und Industriesektoren, auch die Grundthematik der Mobilität ins Rampenlicht. Wie in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich, ist der Transportsektor für rund ein Viertel der weltweiten CO<sub>2</sub> Emissionen verantwortlich und eröffnet somit gleichzeitig auch Potenziale zu wirksamen Einsparungen beim Ausstoß schädlicher Gase.

Klarerweise gliedert sich der Transportsektor in eine Vielzahl von Splittersektoren auf – unter anderem umfasst dieser die Seeschifffahrt, Binnenschifffahrt, den Eisenbahnverkehr, den Luftverkehr sowie den Straßenverkehr.<sup>2</sup> In dieser Arbeit soll besonders letzterer genauer analysiert werden, besser gesagt die Technologien für die Fortbewegung von PKWs und deren Möglichkeiten zu Effizienzsteigerungen mit daraus resultierenden CO<sub>2</sub>– sowie Schadstoffreduktionen.

---

<sup>1</sup> Zeit.de: Weltweiter CO<sub>2</sub>-Ausstoß steigt wieder: Noch im vergangenen Jahr hielten Forscher eine Trendwende beim Ausstoß von Kohlendioxid für möglich. Doch 2017 bringt Ernüchterung (Stand: 13.11.2017), <http://www.zeit.de/wissen/umwelt/2017-11/co2-ausstoss-anstieg-klimawandel-fossile-brennstoffe-global-carbon-project?print> [Zugriff: 12.02.2018]

<sup>2</sup> Vgl. Wirtschaftslexikon24.com: Transport, <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/transport/transport.htm> [Zugriff: 12.02.2018]



**Abbildung 1: Verteilung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit nach Sektor im Jahr 2015<sup>3</sup>**

## 1.1 Problemstellung

Die Effizienzsteigerung von PKWs beschäftigt den gesamten Industriezweig bereits seit geraumer Zeit – aber besonders die aktuellen Geschehnisse rund um den Volkswagen Skandal und die Dieselkrise verstärken noch mehr die öffentliche Aufmerksamkeit und das Interesse für die Thematik der Effizienz, des Verbrauchs fossiler Brennstoffe als auch des Umweltschutzes.

Zunehmende Kostensensitivität der Verbraucher, in Bezug auf steigende Treibstoffpreise, bestärkt einen Großteil der Käuferschicht zur Wahl entweder eines effizienteren, sparsameren PKWs oder es wird zumindest zur sparsamere Motorisierung tendiert. Hinzu kommen auch die unterschiedlichen steuerlichen Hintergründe, welche die Kaufentscheidung maßgeblich beeinflussen können – so wird z.B. in Österreich die Kfz-Steuer nach der kW Leistung des Fahrzeuges bemessen.<sup>4</sup> Auch deshalb kann es besonders hier dazu führen, dass bei sowieso nur erlaubten Maximalgeschwindigkeiten von 130 km/h auf österreichi-

---

<sup>3</sup> Bildquelle: Statista.de: Verteilung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit nach Sektor im Jahr 2015, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167957/umfrage/verteilung-der-co-emissionen-weltweit-nach-bereich/> [Zugriff: 08.02.2018]

<sup>4</sup> Vgl. bmf.gv.at: Motorbezogene Versicherungssteuer, [https://www.bmf.gv.at/steuern/fahrzeuge/motorbezogene-versicherungssteuer.html#Gegenstand\\_der\\_Steuer](https://www.bmf.gv.at/steuern/fahrzeuge/motorbezogene-versicherungssteuer.html#Gegenstand_der_Steuer) [Zugriff: 12.02.2018]

schen Autobahnen gerne zum kostengünstigeren, sparsameren und steuergünstigeren Fahrzeug gegriffen wird.

Auch seitens der Politik wird Druck auf die Automobilhersteller ausgeübt: Neben steigenden Umweltauflagen z.B., dass ab 2020 in der EU alle neu zugelassenen Fahrzeuge im Schnitt nur mehr 95 g CO<sub>2</sub>/km ausstoßen dürfen<sup>5</sup>, setzen einige Staaten auch auf Anreizmechanismen zum Kauf von Hybridfahrzeugen bzw. Elektrofahrzeugen. Anreizmöglichkeiten seitens des Staates beinhalten i.d.R. Steuererminderungen während des Betriebs des Fahrzeuges oder Kaufprämien.

All diese Einflussfaktoren, seien sie seitens des Staates, der Kunden oder aus Imagegründen, zwingen die Automobilindustrie langfristig umzudenken und sich an neuen Technologien zur Effizienzsteigerung moderner PKWs zu orientieren.

## 1.2 Zielsetzung

Die Arbeit soll sich zwei grundlegenden Thesen widmen:

- Die konventionellen Mittel zur Effizienzsteigerung von modernen PKWs sind durch ihren technischen Reifegrad erschöpft - sie bieten somit kaum noch Potenziale zu gravierenden Verbrauchsminderungen.
- Die Hybridtechnologie dient als „Brückentechnologie“ hin zur zukünftigen Elektromobilität der breiten Masse.

Daraus resultierend beschäftigen sich die nachfolgenden Kapitel anfangs mit den verschiedenen, bereits etablierten, technischen Lösungsmöglichkeiten zur Steigerung der Effizienz von modernen Fahrzeugen. Dabei soll auch deren Bedeutung für die verschiedenen Anspruchsgruppen wie z.B. Kunden oder Hersteller aufgezeigt werden.

Im weiteren Verlauf wird das aktuelle Thema hybrider Antriebskonzepte aufgegriffen und behandelt. Hierbei soll es gelingen die technischen Hintergründe der Hybridtechnologie zu veranschaulichen, deren Daseinsberechtigung zu bestätigen, als auch ihre Bedeutung für zukünftige Innovationen im Fahrzeugbau zu klären.

---

<sup>5</sup> Vgl. Vcd.org: EU setzt Vorgaben für PKW, <https://www.vcd.org/themen/auto-umwelt/co2-grenzwert/> [Zugriff: 12.02.2018]

## 1.3 Methodisches Vorgehen

Nach der Einleitung, als Überblick über das Spektrum der Diplomarbeit, folgt der Hauptteil „Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung moderner PKWs“, welcher aus drei Hauptkapiteln aufgebaut ist.

Im ersten Teil, dem Karosseriebau, geht es darum einen Einblick in die Thematik in Bezug auf Historie, Leichtbau, als auch Aerodynamik zu erlangen. Das zweite Kapitel Motorentechnik klärt das Funktionsprinzip von Verbrennungsmotoren, den Begriff Downsizing, gewährt Einblick in die Turbotechnologie, Direkteinspritzung, variable Nockenwellenverstellung als auch Zylinderabschaltung. Der dritte und letzte Teil beschäftigt sich mit hybriden Antriebskonzepten, deren Entwicklung als auch den verschiedenen Betriebsweisen sowie Einsatzstrategien. Selbstverständlich werden zu jedem Schwerpunkt nicht nur Vor- und Nachteile angeführt, sondern auch wirtschaftliche Gesichtspunkte aufgezeigt.

Der Schluss widmet sich den Ergebnissen aus den vorhergehenden Kapiteln, ferner sollen zum Abschluss Prognosen und Zukunftsvisionen beschrieben werden.

## 2 Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung moderner PKWs

Der Hauptteil ist in die drei Segmente Karosseriebau, Motorentechnik und Hybride Antriebskonzepte unterteilt. Dies resultiert aus den gravierenden Einflüssen der oben genannten Teilgebiete auf die Gesamteffizienz des Fahrzeuges. Darunter wird in dieser Arbeit vor allem der Treibstoffverbrauch und der daraus folgende Schadstoffausstoß verstanden.

### 2.1 Karosseriebau

Beginnend mit einem kurzen Exkurs in die Historie des Karosseriebaues, richtet sich der Fokus rasch auf Aerodynamik und Leichtbau – den Haupteinflussgrößen für Verbrauchseinsparungen im Karosseriebau.

#### 2.1.1 Historie

Seit Erfindung des Automobils spielt selbstverständlich auch das äußere Erscheinungsbild eine gravierende Rolle für die Kaufentscheidung eines Fahrzeuges. Waren die ersten Fahrzeuge meist, dem Aussehen nach, noch umgebaute, offene Kutschen, bildete sich rasch der Industriezweig der sogenannten Karosseriebauer (Coachbuilder) für Automobile. Es war damals durchaus üblich, dass Fahrzeughersteller nur das Chassis sowie Antrieb lieferten, und dieses Gerippe von Karosseriebauern nach Kundenwunsch mit einem Außenkleid versehen wurde. Daher kommt es auch, dass besonders alte Fahrzeuge mit identen Chassis, meist ein sehr unterschiedliches Erscheinungsbild prägen. Anfangs, dank der einfachen Verarbeitbarkeit, wurde noch oftmals auf Holz für die Aufbauten gesetzt, später verdrängten allerdings sehr rasch Metallkonstruktionen aus Stahl oder Aluminium diesen Werkstoff. Mit dem fortlaufenden Dasein des Automobils nahm der Anteil von Handarbeit im Karosseriebau aus Kosten- und Zeitgründen kontinuierlich ab. Durch immer besser werdende Fertigungs- und Simulationstechnologien wie z.B. Folgeverbundwerkzeuge, Pressen oder Handlingroboter, können auch komplexe Karosseriestrukturen und -formen rasch sowie vergleichsweise kostengünstig hergestellt werden. Auch in Sachen Designkomplexität hat sich der Karosseriebau mit den Jahren stark gewandelt: vergleicht man z.B. ein zehn Jahre altes Fahrzeug mit einem aktuellen, so lässt sich sehr schnell erkennen wie komplex moderne Karosserieformen geworden sind – nicht nur aus Design- und Sicherheitsgründen, sondern insbesondere, weil in den Verarbeitungsprozessen enorme technologische Fortschritte zu verzeichnen sind.

## 2.1.2 Leichtbau

Ein aktuell sehr häufig diskutiertes, und bei Fahrzeugherstellern sehr präsent Thema, ist der Leichtbau. Innovative Werkstoffe, wie z.B. Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) oder eine Kombination von Werkstoffen in Sandwichbauweise, sind nicht nur mehr im Exklusivbereich, Sportwagenbau oder Rennsport vertreten, sondern finden auch ihren Weg in Massenmodelle. Ziel ist es die stetige Gewichtszunahme, aufgrund schwerer Komfort- als auch Sicherheitsausstattungen, durch intelligente Bauweisen und Werkstoffkombinationen zu kompensieren –sowie schlussendlich den Verbrauch zu senken.

### 2.1.2.1 Grundlagen

Bei der Auslegung eines neuen Fahrzeuges spielt besonders das Gewicht, als eine bedeutende Zielgröße, eine enorme Rolle. Dieses ist durch verschiedenste Einflussgrößen wie beispielsweise der Fahrzeugklasse, Antriebsstrangkzept (schwere Batterien bei Hybridfahrzeugen), Werkstoffkonzepten oder Grundarchitektur des Fahrzeuges bestimmt.<sup>6</sup>

Rückführend auf das zweite Newton'sche Axiom  $\boxed{F = m \cdot a}$  (Kraft = Masse x Beschleunigung) lässt sich rasch folgender physikalischer Ansatz formulieren:

An den angetriebenen Rädern wird seitens des Motors ein Drehmoment  $M$  bereitgestellt, dieses berechnet sich aus der Kraft  $F$ , die notwendig ist um das Fahrzeug fortzubewegen, sowie dem Radius  $r$  der Antriebsräder -  $\boxed{M = F \cdot r}$ . Im Zusammenhang mit der Raddrehzahl  $n$  ergibt sich des Weiteren die Antriebsleistung  $P$  -  $\boxed{P = M \cdot \omega}$ , wobei sich die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  aus der Raddrehzahl  $n$  ableiten lässt  $\boxed{\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \div 60}$ .<sup>7</sup>

Man erkennt: wird die zu bewegende Masse  $m$  des Fahrzeuges reduziert, so verringert sich die zum Antrieb notwendige Kraft  $F$  direkt proportional, ebenso das Antriebsdrehmoment  $M$  und daraus folgend die notwendige Motorleistung  $P$ . Kleinere geforderte Leistungen  $P$  seitens des Antriebes resultieren in einer Verringerung des Kraftstoffverbrauches des PKWs.

Praktische Versuche, als auch physikalische Berechnungen, haben diesbezüglich ergeben, dass in der Auslegungsphase unter optimalen Bedingungen maximal rund 0,35 l/100km Verbrauchssenkung pro 100 kg Gewichtseinsparung angenommen werden können. Selbstverständlich darf dies nur als grober Richtwert verstanden werden, da Ein-

---

<sup>6</sup> Vgl. Braess, H., Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 6. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011, S. 101

<sup>7</sup> Vgl. eigene Mitschrift aus dem Mechanik Unterricht sowie Hering, E., Martin, R., Stohrer, M.: Physik für Ingenieure, 12. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2016, S.33 und S. 63f



flussgrößen wie beispielsweise aerodynamisches Verhalten, Luftdruck, Temperatur, Fahrzeugleistung usw. bedeutsamen Einfluss auf den Fahrzeugverbrauch nehmen können.<sup>8</sup>

### 2.1.2.2 Werkstoffe im Karosseriebau

Automobilhersteller drängen zu neuen Alternativen in Bezug auf Karosseriewerkstoffe. Besonders von Interesse sind leichte, gut zu verarbeitende sowie gut zu recycelnde Werkstoffe, welche einerseits das Fahrzeuggewicht reduzieren, andererseits auch wirtschaftlich Ansprüche der Hersteller befriedigen. Die nachstehende Abbildung zeigt am Beispiel eines BMW 7er anschaulich die Massenanteile verschiedener Werkstoffe.

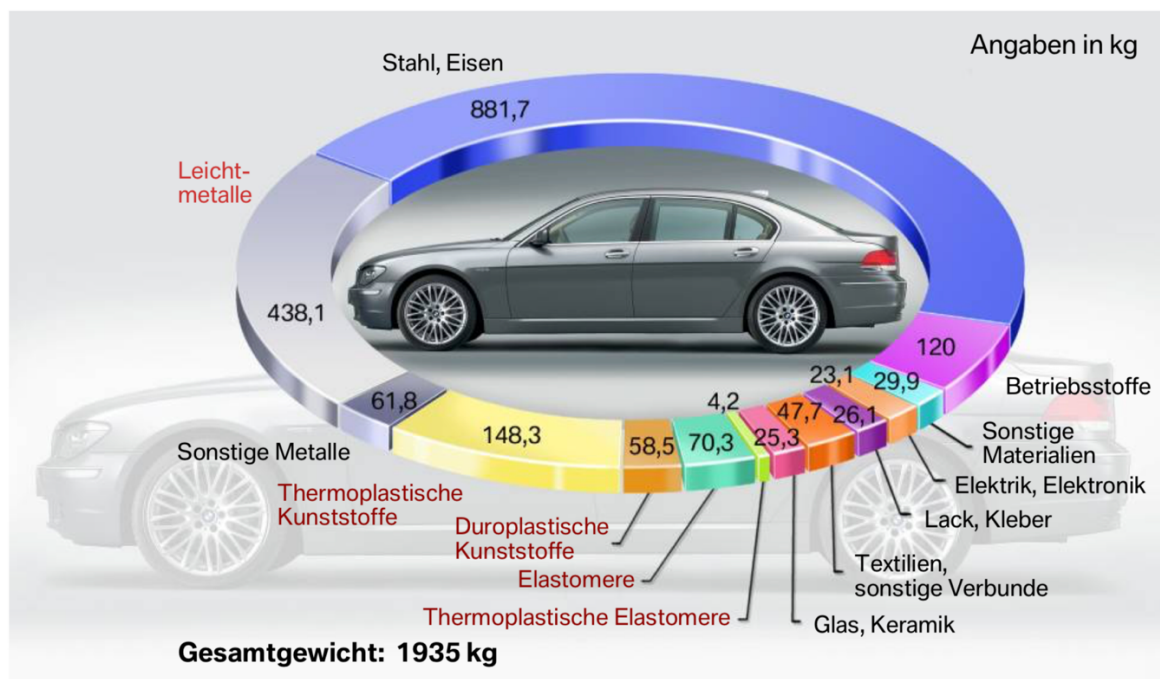


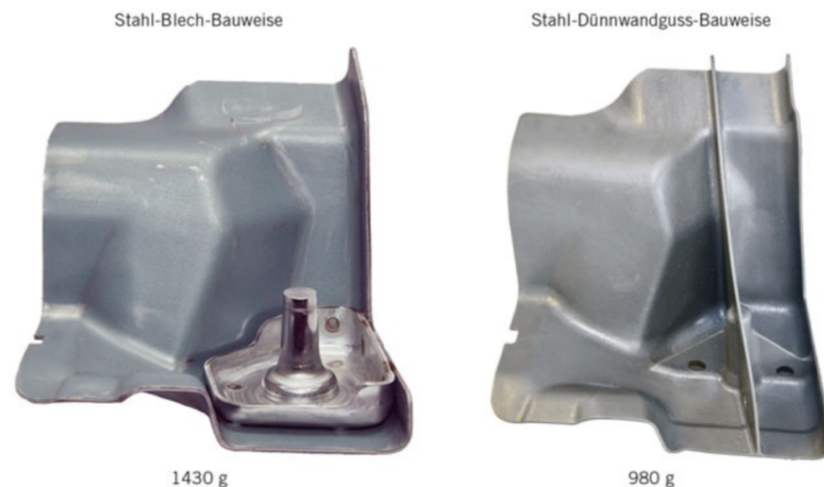
Abbildung 2: Werkstoffzusammensetzung eines BMW 7er<sup>9</sup>

Im Karosseriebau dominiert nach wie vor **Stahl** als der meistverwendete Werkstoff in der Blechverarbeitung – auch an hochbeanspruchten Achs- sowie sicherheitsrelevanten Fahrgastzellenteilen ist er, zumindest was die Großserie betrifft, aktuell nur sehr schwer substituierbar. Ebenso wird dies durch neueste Entwicklungen im Stahlleichtbau Segment verstärkt, hierbei wird auf hochfeste bzw. ultra-hochfeste Stähle gesetzt, welche geringere Wandstärken mit sich bringen. Aktuelle Technologien wie das Dünnwandgussverfahren

<sup>8</sup> Vgl. Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.): Leichtbautechnologien im Automobilbau: Werkstoffe – Fertigung - Konzepte, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 188

<sup>9</sup> Bildquelle: bayern-innovativ.de: Stauber, R.: Werkstoffe im Automobilbau – Anforderungen und Trends: Cluster „Neue Werkstoffe“ in Bayern (26.10.2006), S. 5, [http://www.bayern-innovativ.de/stauber\\_Vortrag](http://www.bayern-innovativ.de/stauber_Vortrag) [Zugriff: 20.02.2018]

ermöglichen somit eine leichte, steife als auch wirtschaftliche Realisierung von Blechkomponenten im Karosseriebau – siehe Folgeabbildung mit Gewichtsvergleich.



**Abbildung 3: Vergleich Stahlblech und Stahl- Dünnwandguss<sup>10</sup>**

Abschließend ist zu vermerken, dass Stahl nicht nur der wirtschaftlichste, sondern auch der weltweit am meisten recycelte Werkstoff ist. Dies alleine unterstreicht auch seine Daseinsberechtigung im Automobilbau der Zukunft.<sup>11</sup> Nach Stahl folgen vermehrt Leichtmetalle wie Aluminium, aber auch verschiedenste Kunststoffe.

**Aluminium**, mittlerweile bewährt, da es bereits im ersten Teil des zwanzigsten Jahrhunderts z.B. bei Sportwagen angewendet wurde, ist heute in fast allen Fahrzeugen anzutreffen. Richtig durchgestartet ist der Werkstoff allerdings mit Audi im Jahr 1994 durch die Einführung der großserientauglichen Space Frame Technologie (ASF) mit dem ersten Audi A8. Dessen selbsttragende Karosserie besteht komplett aus Aluminium und konnte dank des geringeren Gewichts, im Vergleich zu den Mitbewerbern BMW 7er und Mercedes S Klasse, auch mit geringerem Treibstoffverbrauch als auch Schadstoffemission punkten. Durch die Anwendung des ASF können im direkten Vergleich zu einer Karosserie aus Stahl bis zu 40% Gewichtersparnis erzielt werden.<sup>12</sup> Selbstverständlich gibt es allerdings auch eine Kehrseite der Medaille: Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich ist zur Aluminiumgewinnung ein Vielfaches mehr an Energie als zur Stahlherstellung not-

---

<sup>10</sup> Bildquelle: Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.): Leichtbautechnologien im Automobilbau: Werkstoffe – Fertigung - Konzepte, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 162

<sup>11</sup> Vgl. Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.): Leichtbautechnologien im Automobilbau: Werkstoffe – Fertigung - Konzepte, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 161

<sup>12</sup> Vgl. Audi-Technology-Portal.de: Audi Space Frame, <https://www.audi-technology-portal.de/de/karosserie/aluminiumkarosserien/audi-space-frame-asf> [Zugriff: 20.02.2018]

wendig – dies zeigt sich auch im knapp zehnfachen Ausstoß von Kohlendioxid bei der Herstellung.

**Tabelle 1: Vergleich Aluminium und Stahl<sup>13</sup>**

	<b>Aluminium</b>	<b>Stahl</b>
<b>Dichte:</b>	2698 kg / m <sup>3</sup>	7840 m <sup>3</sup> .
<b>Primärenergieaufwand:</b>	69,0 kWh / kg Material	6,31 kWh / kg Material
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung</b>	16,1 kg CO <sub>2</sub> / kg Material	1,65 kg CO <sub>2</sub> / kg Material

An dritter Stelle nach Stahl und Leichtmetallen folgen **Kunststoffe** – hierunter werden z.B. Duroplaste, Thermoplaste und Faserverstärkte Kunststoffe wie CFK verstanden. Der Werkstoff wird überwiegend (bis zu 62%) im Interieur eingesetzt, wo er beispielsweise als Armaturenräger, Abdeckungen, Griffe, Knöpfe usw. angetroffen werden kann. Am Exterieur sind heute üblicherweise Stoßstangen, Unterbodenschutz, Schweller, Schweinwerfer und verschiedenste Verkleidungselemente daraus aufgebaut.

**Duro- und Thermoplaste** zeichnen sich durch die wirtschaftliche Herstellung, die fast uneingeschränkte Formgebung, UV-Beständigkeit, Recyclingfähigkeit sowie die gute Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse aus. Die angewandten Herstellungsprozesse Spritzgießen, Pressen oder Extrusionsblasen sind ausgereift und wirtschaftlich in Massenproduktion durchführbar.<sup>14</sup> Im Bezug auf mechanische Eigenschaften wie z.B. Festigkeit oder Verwindungssteifigkeit können die beiden oben genannten Kunststoffarten allerdings meist nicht mit faserverstärkten Kunststoffen mithalten.

**Faserverstärkte Kunststoffe**, seien es Glasfaserverstärkter Kunststoffe (GFK) oder Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK), zeichnen sich durch sehr gute mechanische Eigenschaften als auch enormes Leichtbaupotenzial aus. GFK wurde bereits in den sechziger Jahren des vorherigen Jahrhunderts vom britischen Sportwagenhersteller Lotus für seine Sport- und Rennfahrzeuge eingesetzt. Durch die extrem leichte Karosseriekonstruktion konnte die weitaus stärkere motorisierten Konkurrenten der damaligen Zeit abgehängt werden. Heute allerdings spielt GFK im Vergleich zu CFK kaum noch eine Rolle – der Markt letzteren Werkstoffes ist jener mit den höchsten Wachstumsraten innerhalb der

---

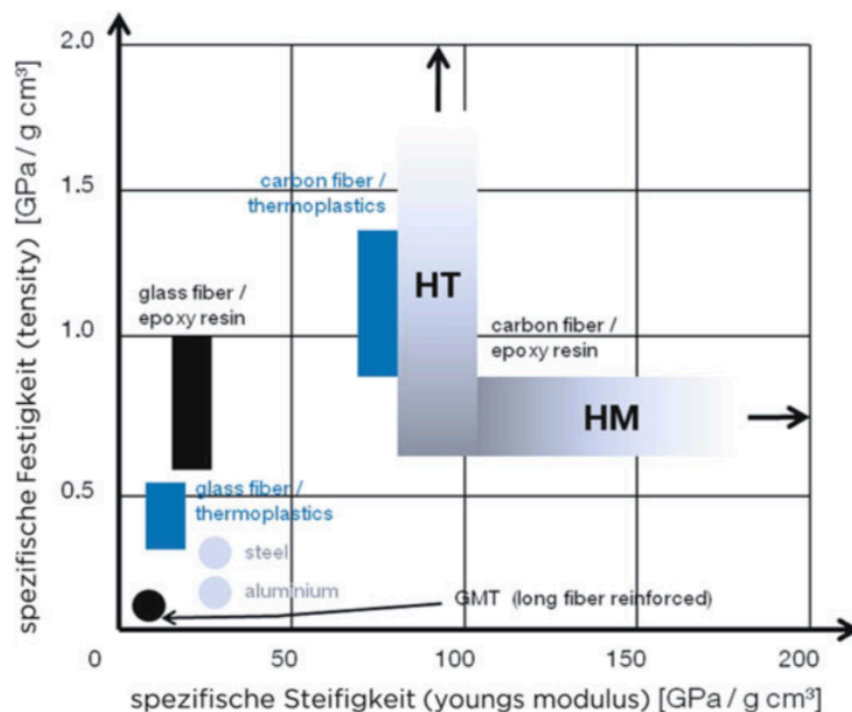
<sup>13</sup> Tabellenquelle: tu-braunschweig.de, Müller, R.: Soll man Autos aus Aluminium bauen? :Ein Beispiel für „Fermi-Probleme“ in der Schule, <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/aluminiumautos.pdf> [Zugriff: 20.02.2018]

<sup>14</sup> Vgl. Friedrich, H. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S390ff

Fahrzeugindustrie. So wurden im Jahr 2010 bereits rund 35.000 Tonnen CFK verbraucht, klarerweise nur ein Bruchteil im Vergleich zu Aluminium (40 Mio. Tonnen) oder Stahl (1,4 Mrd. Tonnen).

Doch warum ist das Interesse an den geflochtenen und mit Harz imprägnierten Kohlenstofffasern so hoch?

Der Werkstoff bietet vergleichbare Festigkeitseigenschaften wie Aluminium, spart allerdings rund 30% an Gewicht ein – sogar 60% gegenüber Stahl. Des Weiteren können sehr einfach geometrisch komplexe Bauteile auch für höchste Beanspruchungen hergestellt werden. Die Folgeabbildung lässt erkennen, dass die Kohlefaserwerkstoffe (graue Balken, Bildmitte) im Vergleich zu metallischen Werkstoffen (Stahl und Aluminium unten links im Bild) aus Festigkeitsaspekten deutlich überlegen sind.



**Abbildung 4: Gewichtsspezifischer Eigenschaftsvergleich von Werkstoffen<sup>15</sup>**

Einzig die Wirtschaftlichkeit der Herstellung von CFK ist noch nicht gewährleistet – der sehr hohe Anteil von Handarbeit (beispielsweise beim Laminieren) treibt die Herstellkosten entlang der gesamten Wertschöpfungskette bisweilen noch in die Höhe. Deshalb ist der Masseneinsatz noch gehemmt, besonders unter der Berücksichtigung, dass ein kg

<sup>15</sup> Bildquelle: Friedrich, H. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 407

CFK rund 15 € Kosten, die selbe Masse Stahl nur wenige Euro. Dahingehend wird bereits intensiv an Lösungen zur kostengünstigen Massenfertigung des innovativen Werkstoffes, als auch an Recyclingmöglichkeiten geforscht.<sup>16</sup> Anzutreffen ist CFK im Rennsport, als auch bei Sportwagen z.B. als Fahrgastzelle, Monocoque genannt. In der breiten Massenproduktion ist es erstmals beim BMW i3 als auch beim aktuellen BMW 7er in Sandwichbauweise anzutreffen. Hier werden Strukturelemente aus Metall mit CFK Komponenten in ihrer Steifigkeit verstärkt, sowie deren Gesamtgewicht reduziert.

Generell lässt sich schlussfolgern: je leichter die Konstruktion bei gleichbleibenden mechanischen Eigenschaften werden soll, umso höher sind Engineering-, Material- als auch Fertigungskosten. Hersteller versuchen in die kostenminimale Konstruktion zu wählen, werden aber in Angesicht strikterer staatlicher Vorgaben im Hinblick auf Umweltpolitik gezwungen, dieses Kostenoptimum, in Richtung Leichtbau, zu verlassen.

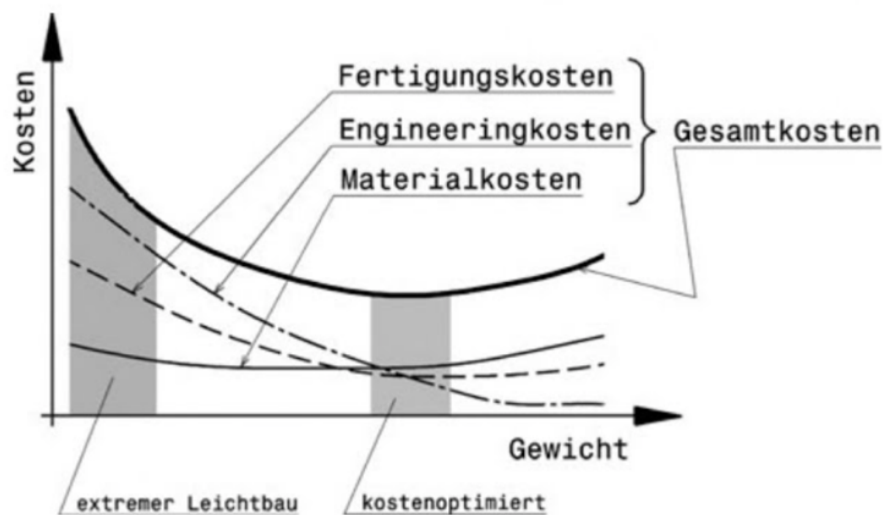


Abbildung 5: Zusammenhang Gewicht und Gesamtkosten<sup>17</sup>

### 2.1.3 Aerodynamik

Neben dem Fahrzeuggewicht oder den Rollwiderständen der Reifen steuert insbesondere die Aerodynamik eines Fahrzeuges zur Effizienz eines Fahrzeuges bei. Deshalb soll in diesem Abschnitt kurz in die physikalischen Grundlagen, sowie praktische Maßnahmen zur Verbesserung der Aerodynamik eines PKWs eingegangen werden.

<sup>16</sup> Vgl. Friedrich, H. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 404ff

<sup>17</sup> Bildquelle: Trzesniowski, M.: Rennwagentechnik: Grundlagen – Konstruktion – Komponenten – Systeme, 4. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 52

### 2.1.3.1 Grundlagen der Aerodynamik

Die Luftwiderstandskraft ist die Schlüsselgröße in der Aerodynamik eines Fahrzeuges. In die Berechnung selbiger werden Einflüsse wie die Luftdichte  $\rho_L$ , die Fahrgeschwindigkeit  $v$ , der Anströmquerschnitt  $A_p$  sowie der Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  einbezogen und somit ergibt sich die allgemeine Formel für die Luftwiderstandskraft: 
$$F_w = \frac{\rho_L \cdot v^2}{2} * A_p * c_w$$
.<sup>18</sup>

In der Aerodynamik ist der Luftwiderstandsbeiwert ein Hilfsmittel zur Angabe der Windschlüpfrigkeit eines Objekts, wenn es mit Strömung beaufschlagt wird. Aus der oben angegebenen Formel erkennt man rasch, dass die Fahrgeschwindigkeit aufgrund ihrer quadratischen Potenz besonders großen Einfluss auf  $F_w$  nimmt – allerdings muss angemerkt sein, dass seitens der Hersteller nur der Anströmquerschnitt sowie der  $c_w$ -Wert baulich beeinflusst werden können – mehr dazu im Folgeabschnitt.

Die nachfolgende Grafik veranschaulicht nochmals den geschwindigkeitsabhängigen Verlauf von  $F_w$  und dem Rollwiderstand, welcher sich relativ konstant verhält, am Beispiel einer Mercedes B-Klasse. Zum Vergleich wurde ebenfalls die notwendige Beschleunigungskraft für eine Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$ , als auch eine Hangabtriebskraft von einer 5%-Steigung eingezeichnet. Dies verdeutlicht, dass der Luftwiderstand ab rund 60 km/h größer als der Rollwiderstand ist, die Bewältigung einer 5%-Steigung vom Kraftaufwand einer 150 km/h Fahrt in der Ebene gleicht, und, dass der Kraftaufwand für eine Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$  dem Luftwiderstand von 230 km/h entspricht. Dies verdeutlicht, dass neben der notwendigen, massenabhängigen Beschleunigungskraft für das Fahrzeug selbst (siehe Abschnitt 2.1.2.1) auch noch die Einflusskräfte für Luftwiderstand, Steigung als auch Rollwiderstand vom Motor, in Form von Leistungs- bzw. Drehmomentbereitstellung, überwunden werden müssen. Bei der Annahme von konstanter Fahrgeschwindigkeit muss ein Motor eines PKWs, welcher geringere Werte von  $c_w$  und  $A_p$  aufweist, weniger Antriebskraft, Drehmoment sowie schlussendlich Leistung aufbringen, was geringere Kraftstoffverbräuche bedingt.

Moderne Fahrzeuge erreichen bei optimaler Auslegung einen minimalen  $c_w$ -Werte von rund 0,25 (allerdings liegen beispielsweise die aktuell sehr im Trend liegenden SUVs weit darüber) – Verbesserungsmaßnahmen können diesen verringern.<sup>19</sup>

---

<sup>18</sup> Vgl. eigene Mitschrift aus dem Mechanik Unterricht sowie Böge, A.: Technische Mechanik: Statik – Dynamik – Fluidmechanik – Festigkeitslehre, 28. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S.157

<sup>19</sup> Vgl. Schütz, T. (Hrsg.): Hucho – Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik – Wärmetechnik – Fahrdynamik – Komfort, 6. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 53

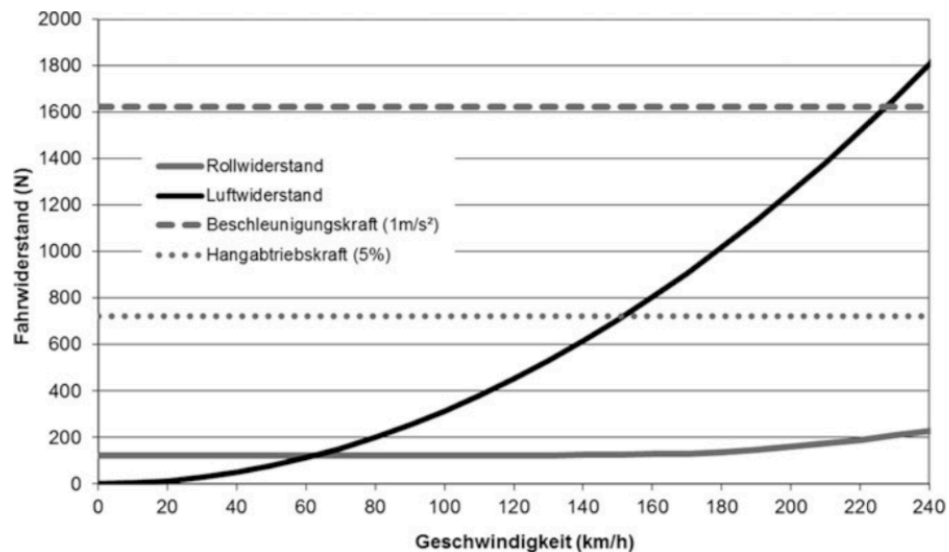


Abbildung 6: Geschwindigkeitsabhängiger Verlauf der Fahrkräfte<sup>20</sup>

### 2.1.3.2 Maßnahmen zur Verbesserung der Aerodynamik

In modernen PKWs werden alle relativ kostengünstigen Maßnahmen zur Aerodynamikverbesserung seitens der Hersteller genutzt – hierzu gehören z.B.:

- Sehr gute aerodynamische Abstimmung besonders des, für viele Verwirbelungen verantwortlichen, Heckbereiches (optimale Heckdeckelhöhe, Abrisskanten und Heckdiffusor).
- Abdichtung des Motorhauben- und Scheinwerferumfeldes sowie ein abgedichtetes Kühlersegment um eine effiziente sowie widerstandsarme Kühlung zu garantieren.
- Abdeckung des Unterbodens (der Unterbau insgesamt ist für ca. 50% des gesamten  $c_w$ -Wertes verantwortlich, wobei 35% auf Radhäuser und Räder selbst entfallen, somit bleiben 15% welche direkt durch die Unterbodengestaltung beeinflussbar sind.<sup>21</sup>)
- Optimierung der Radhäuser, Verminderung von Staudrücken in den Radhäusern durch gezielte Platzierung von Ein- und Auslässen (siehe BMW Patent Air Curtain und Air Breather), sowie optimale Umströmung selbiger durch Bugschürzengestaltung.
- Aerodynamische Optimierung von Anbauteilen wie z.B. Scheibenwischerarmen oder Seitenspiegeln.

<sup>20</sup> Bildquelle: Schütz, T. (Hrsg.): Hucho – Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik – Wärmetechnik – Fahrdynamik – Komfort, 6. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 144

<sup>21</sup> Vgl. Pischinger, S., Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S.67

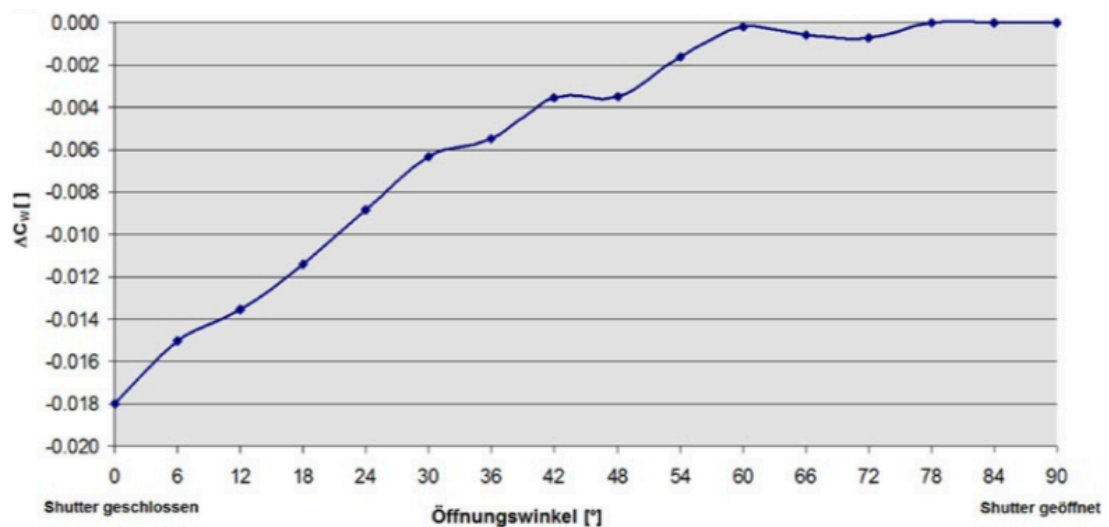


Weitere wirksame, allerdings mit erheblichen Mehrkosten für die Hersteller verbundenen, Verbesserungsmaßnahmen wären beispielsweise:

- Jalousien im Kühlergrill zur Regelung des Kühlstromes, sowie zur Verminderung des Luftwiderstandes. Bei Kälte, um den Motor rascher auf Betriebstemperatur zu bringen, bzw. falls keine Kühlleistung benötigt wird, werden die Jalousien geschlossen, bei Kühlbedarf geöffnet. Potenzial  $c_w$ -Wert Verringerung: -0,005 bis max. -0,018 (siehe Folgeabbildungen).



**Abbildung 7: Offene Jalousie (links) für Kühlwirkung, geschlossene Jalousie (rechts) für verringerten  $c_w$ -Wert<sup>22</sup>**



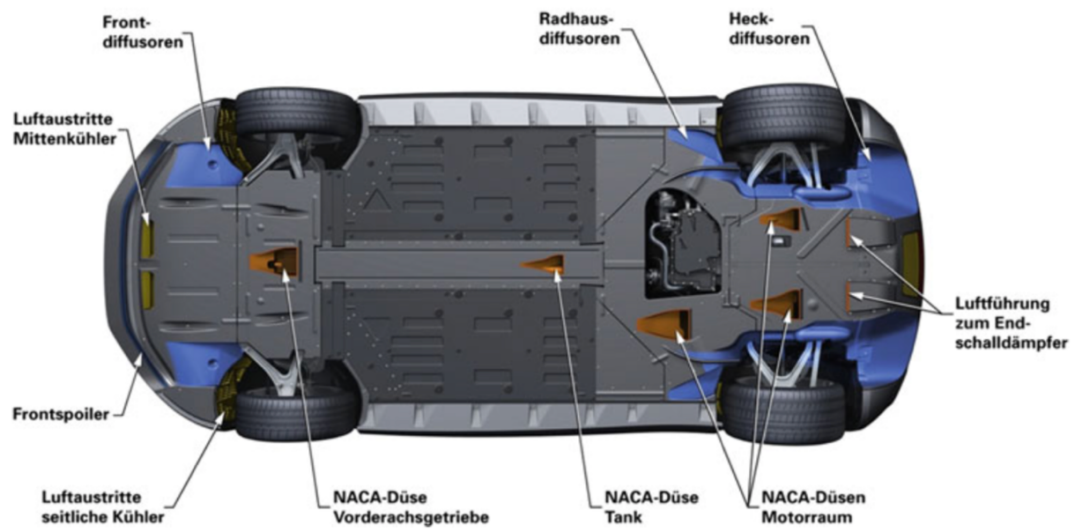
**Abbildung 8: Zusammenhang Öffnungswinkel der Kühlerjalousie und  $c_w$ -Wert<sup>23</sup>**

<sup>22</sup> Bildquelle: Schütz, T. (Hrsg.): Hucho – Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik – Wärmetechnik – Fahrdynamik – Komfort, 6. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 305

<sup>23</sup> Bildquelle: Schütz, T. (Hrsg.): Hucho – Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik – Wärmetechnik – Fahrdynamik – Komfort, 6. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 306



- Verkleidung des Unterbodens inkl. der Kardanwelle, Abgasanlage sowie Achsen. Hier ist allerdings darauf zu achten, dass trotz der Kapselung eine ausreichende Kühlung der Bauteile (z.B. Abgasanlage, Differentiale, Getriebe) gewährleistet ist. Potenzial  $c_w$ -Wert Verringerung: -0,005 bis max. -0,015. Nachstehende Abbildung zeigt den aerodynamisch optimierten Unterboden eines Audi R8.



**Abbildung 9: Unterbodenverkleidungen Audi R8<sup>24</sup>**

- Niveauregulierung zum Absenken des Fahrzeuges bei höheren Geschwindigkeiten. Solche Methoden werden üblicherweise bei Fahrzeugen, welche bereits ein Luftfahrwerk verbaut haben, angewendet. Im SUV Segment sind beispielsweise der Porsche Cayenne oder der Land Rover Range Rover in der Lage, eine Tieferlegung des Fahrzeuges durchzuführen. Potenzial  $c_w$ -Wert Verringerung: -0,004 pro 10 mm Tieferlegung.
- Heckspoiler oder -flügel welche sich je nach Geschwindigkeit und Fahrsituation justieren.

Abschließend soll die Verbrauchseinsparung durch  $c_w$ -Wert Verringerungen nicht unerwähnt bleiben: Bei einer Verminderung des Widerstandbeiwertes um -0,01 ergeben sich bei einer Konstantfahrt mit 150 km/h eine Ersparnis von bis zu 0,15 l/100 km, was einer Gewichtseinsparung von rund 215 kg entspricht. Geringer ist der Einfluss im Stadtverkehr, wo nur ca. 0,01 l/100km eingespart werden können. Dies ist den geringeren Fahrgeschwindigkeiten, sowie häufigem Stop-and-Go Verkehr geschuldet.<sup>25</sup>

<sup>24</sup> Bildquelle: Schütz, T.: Fahrzeugaerodynamik: Basiswissen für das Studium, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S.122

<sup>25</sup> Auch Aufzählungen S. 13-15: Vgl. Schütz, T. (Hrsg.): Hucho – Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik – Wärmetechnik – Fahrdynamik – Komfort, 6. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 169f

### 2.1.4 Wirtschaftliche Aspekte des Karosseriebaus

Zum Ende des Kapitels Karosseriebau sollen nochmals verschiedene wirtschaftliche Aspekte und Fragestellungen aus Kunden- sowie Herstellersicht formuliert werden.

Beginnend mit den verschiedenen Werkstoffen im Karosseriebau sind aus Herstellersicht selbstredend die totalen Herstellungskosten von Bedeutung – diese sind, wie bereits beschrieben bei Leichtmetallen, als auch speziellen Kunststoffen wie CFK, um ein Vielfaches höher als bei Stahl. Hier gilt es abzuwägen wie hoch die tatsächlichen Gewichtseinsparungen zur Erreichung der Emissionsvorgaben sein müssen, um daraus folgend die optimale Werkstoffauswahl zu treffen. Andererseits ist es eine Verschiebung des Problems, wenn man, um Emissionsziele zu erreichen, Werkstoffe, welche in der Herstellung um ein Vielfaches mehr Energie benötigen, einsetzt. Die ausgestoßenen Schadstoffe sowie der Energiebedarf kommen dann nicht von den Fahrzeugen selbst, dafür von der Herstellerindustrie.

Aus Kundensicht scheint die Werkstoffauswahl auf den ersten Blick recht unwichtig zu sein – allerdings kann sich dies bei einem Schaden am PKW recht schnell ändern. So ist es beispielsweise um ein Vielfaches teurer Elemente aus Aluminium zu reparieren oder auszutauschen – dies schlägt sich auch in höheren Versicherungsprämien für Kunden nieder. Klarerweise kann das verminderte Gewicht zu Verbrauchsminderungen führen, allerdings ist hier eine erhebliche Laufleistung notwendig um die höheren Kosten für Anschaffung, Reparaturen als auch Versicherung zu kompensieren. CFK wird hauptsächlich bei Sportwagen eingesetzt – ein kleiner Streifschaden reicht aus um den Wechsel eines ganzen Panels, mit immensen Kostenaufwand, zu erzwingen. Bei Großserienfahrzeugen mit Strukturelementen aus CFK, wie dem BMW i3, soll mit Hilfe von Austauschelementen, ähnlich einem Reparaturblech, abgeholfen werden. Ob diese Lösung langfristig erfolgreich sowie kostenmäßig sinnvoll ist sei dahingestellt – momentan ist noch keine bessere Lösung gefunden.

Des Weiteren ist die Frage nach dem Recycling von CFK noch offen – zwar gibt es neue technische Möglichkeiten die Fasern wieder freizulegen und wiederzuverwenden, allerdings ist dies mit erhöhtem Aufwand sowie nachfolgenden Festigkeitseinbußen des recycelten Kunststoffes verbunden.<sup>26</sup> Dennoch ist der Autor der Meinung, dass in Zukunft der Anteil von wiederverwendeten Kohlenstofffasern, um der kostenintensiven Urherstellung auszuweichen, zunehmen wird. Durch Spritzgießen hergestellte Thermoplastbauteile, welche sich kostengünstig herstellen, tauschen und recyceln lassen, werden auch weiterhin in Zukunft eine wichtige Rolle im Automobilbau spielen.

---

<sup>26</sup> Vgl. Goldmann, D., Martens, H.: Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 307

Aus Herstellersicht sind aerodynamische Aspekte immer von Interesse, da dahinter nur einmalige Entwicklungskosten stehen, nicht wie beim Leichtbau gesteigerte Herstellkosten aufgrund höherer Materialpreise. Die einmalige aerodynamische Entwicklung kann dann in die Großserie implementiert werden und reduziert so vergleichsweise einfach den Flottenverbrauch sowie Schadstoffausstoß. Problematisch ist hierbei der nicht abflauende Trend zu SUVs – die großen Stirnflächen, sowie erhöhten  $c_w$ -Werte (i.d.R.  $>0,32$ )<sup>27</sup> der Fahrzeuge treiben die Luftwiderstandskraft, somit die benötigte Antriebskraft, -drehmoment und schlussendlich Leistung in die Höhe. Dies wiederum führt unweigerlich zu höheren Treibstoffverbräuchen als auch Schadstoffausstößen. Daraus ergibt sich ein grundlegendes Problem: auch wenn SUVs durch verschiedenste Maßnahmen aerodynamisch gestaltet sind, verfügen sie unumgänglich trotzdem über große Stirnflächen sowie i.d.R. über hohes Fahrzeuggewicht was das Streben nach Effizienz in dieser Fahrzeugklasse im Grunde genommen sinnlos macht. Die unveränderlichen äußeren Hauptmerkmale eines SUVs wie z.B. die Größe oder das wuchtige Erscheinungsbild, erhöhen den Verbrauch viel mehr, als durch Einsparungsmöglichkeiten gewonnen werden können.

## 2.2 Motorentechnik

Der Verbrennungsmotor als treibendes Element für PKWs wird seit seiner Erfindung stetig verbessert. Anfangs um mehr Leistung zu generieren, heute um bei mindestens gleichbleibender Leistung weniger Kraftstoff zu verbrauchen, also effizienter zu arbeiten. Welche Stellschrauben es gibt, um die Effizienz eines Motors zu erhöhen, soll in diesem Kapitel, beginnend bei den Grundlagen des Verbrennungsmotors, bearbeitet werden. Der Fokus der Arbeit liegt hierbei auf dem Benzin Verbrennungsmotor, da dieser auch seitens der Hersteller mittlerweile in Kombination mit der Hybridtechnik forciert wird.

### 2.2.1 Funktionsprinzip eines Verbrennungsmotors

Ein Verbrennungsmotor ist eine Kraftmaschine welche durch Verbrennung von zugeführter Luft sowie Kraftstoff eine Drehbewegung der Kurbelwelle (Drehmoment), Abwärme und Abgase produziert.<sup>28</sup> Wie viel der im Kraftstoff gespeicherten Energie in tatsächliches Drehmoment umgewandelt wird, beschreibt der Wirkungsgrad – dieser beträgt im optimalen Lastpunkt bei PKW Otto Motoren maximal rund 37%, 42% bei PKW Dieselmotoren.

---

<sup>27</sup> Vgl. Schütz, T. (Hrsg.): Hucho – Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik – Wärmetechnik – Fahrdynamik – Komfort, 6. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 363

<sup>28</sup> Vgl. Schreiner, K.: Verbrennungsmotor – kurz und bündig, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S 2

Im Leerlauf beträgt der Wirkungsgrad quasi 0%, da trotz Verbrennung kein Vortrieb generiert wird.<sup>29</sup>

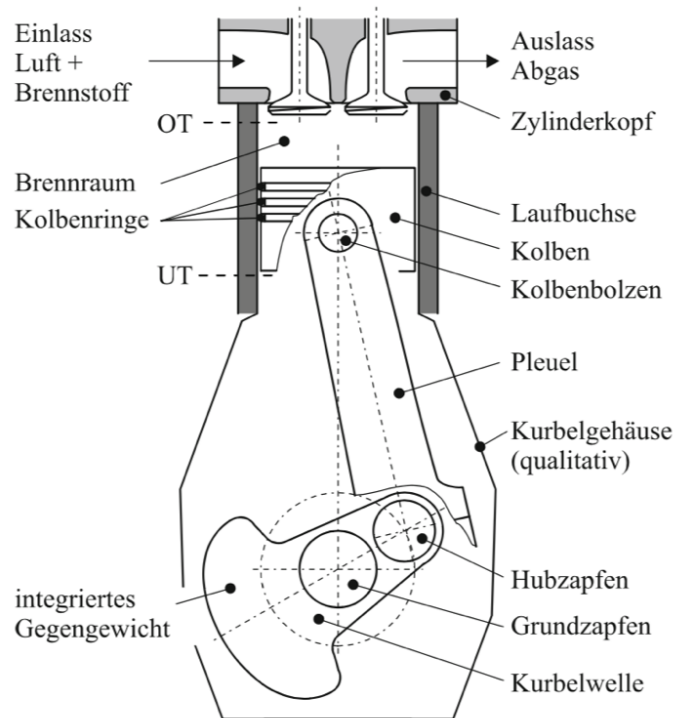
### **2.2.1.1 Wichtige Bauteile eines Verbrennungsmotors**

Wie bereits erwähnt, wandelt ein Verbrennungsmotor die chemische Energie des Kraftstoffes zum Teil in kinetische, den Rest in Wärmeenergie um. Um diesen Prozess sicher zu gewährleisten sind eine Vielzahl von Präzisionsbauteilen innerhalb des Motors notwendig – hierzu gehören:

- Motorblock: In den einzelnen Zylindern bewegen sich die Kolben auf und ab, ebenso ist üblicherweise am unteren Ende des Motorblockes die Kurbelwelle angebracht.
- Zylinderkopf: Dichtet die Zylinder des Motorblocks nach oben hin ab, im Zylinderkopf befinden sich die Ein- und Auslassventile, Nockenwellen, Einspritzdüsen sowie Zündkerzen.
- Kolben und Pleuel: Sie leiten die Expansionskraft aus der Verbrennung bzw. Explosion zur Kurbelwelle weiter.
- Zündkerzen: Zünden das Luft-Benzin Gemisch sobald der Kolben die Nähe des oberen Totpunktes (OT) erreicht.
- Nockenwellen: Diese steuern die Öffnungsbewegung der Ventile (Ein- und Auslassventil) im Brennraum.
- Kurbelwelle: Sie wandelt die lineare Bewegung der Kolben in eine Drehbewegung um und ist zwischen Motorblock und Kurbelwellengehäuse gelagert.
- Einspritzung: Entweder direkt in den Brennraum, oder in die Ansaugung vor dem Zylinder.
- Sonstige wichtige Bauteile: Ansaugung, Abgaskrümmer, Ölkreislauf (Wanne und Pumpe), Kühlkreislauf, elektronische Steuergeräte, Kraftstoffleitungen, Entlüftungen, Filterelemente (Kraftstoff, Öl, Luft) usw.

---

<sup>29</sup> Vgl. Böge, A., Böge, W. (Hrsg.): Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 23. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 1134



**Abbildung 10: Hauptbestandteile eines Kolbenmotors<sup>30</sup>**

Neben Kolbenmotoren (wie oben dargestellt) gibt es auch Wankelmotoren, welche durch ihre kompakte Bauweise punkten können – allerdings machen sie das geringe Drehmoment sowie relativ hoher Verbrauch an Öl und Kraftstoff ungeeignet für hocheffiziente Motorkonzepte und deshalb auch unbrauchbar in modernen Antriebskonzepten.<sup>31</sup>

Was die Zylinderanordnung betrifft, findet man in aktuellen Fahrzeugen Reihen-, V-, W- sowie Boxermotoren, wobei die beiden ersteren Varianten am populärsten sind.

### 2.2.1.2 Arbeitszyklen eines Verbrennungsmotors

Der in modernen PKWs verwendete Otto-Motor arbeitet in vier Haupttakten (siehe Folgeabbildung):

- a) Ansaugtakt
- b) Verdichtungstakt
- c) Arbeitstakt
- d) Ausstoßtakt

<sup>30</sup> Bildquelle: Merker, G., Teichmann, R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise – Simulation – Messtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 13

<sup>31</sup> Vgl. Gruden, D.: *Umweltschutz in der Automobilindustrie: Motor, Kraftstoffe, Recycling*, 1. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008, S. 363



## 2.2.2 Downsizing

Wie der Name bereits suggeriert, versteht man unter Downsizing eine Verkleinerung, Schrumpfung, Abnahme einer Kenngröße – nämlich des Hubraumes eines Verbrennungsmotors. Wie das geschehen kann, welche Auswirkungen daraus hervorkommen und weshalb Downsizing aktuell sehr im Trend liegt, sollen die nachstehenden Unterpunkte erläutern.

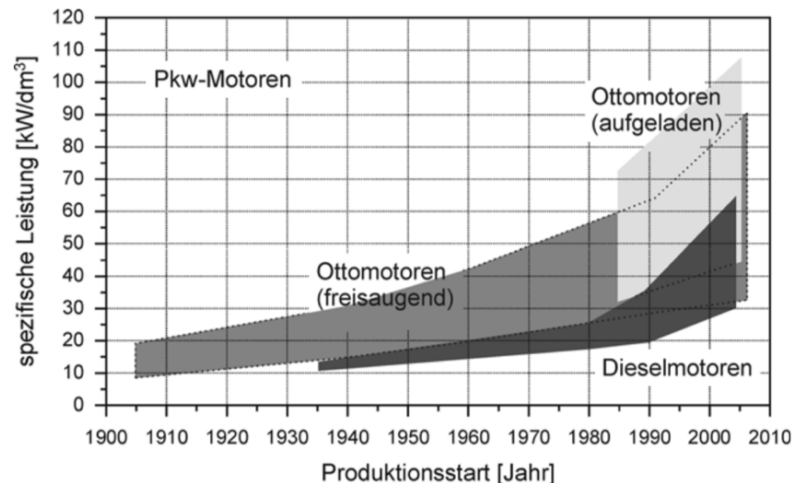
### 2.2.2.1 Grundlagen

Wie bereits erwähnt, geht es beim Thema Downsizing prinzipiell um den Hubraum eines Motors. Würde man, ohne sonstige Eingriffe, das Hubvolumen verringern, so hätte dies unweigerlich ein geringeres Motordrehmoment bzw. -leistung zum Ergebnis, was die Kraftmaschine u.U. für den geplanten Verwendungszweck ungeeignet machen könnte. Man muss also weitere Eingriffe durchführen um den Motor, auch bei geringerem Hubraum, weiterhin ohne Einschränkungen nutzbar zu machen. Dies erfolgt heutzutage entweder durch die Erhöhung der Nenndrehzahl (wie bereits in 2.1.2.1 erkannt, setzt sich die Leistung aus dem Drehmoment und der Winkelgeschwindigkeit bzw. Drehzahl zusammen – erhöht man also die Drehzahl bei konstantem Moment, so ergibt sich eine Leistungssteigerung) oder durch die Erhöhung des Mitteldruckes (mittlerer Druck über den gesamten Arbeitszyklus). Letzteres bedingt größere Kolbenkräfte mit schlussendlich höheren umgewandelten Drehmomenten an der Kurbelwelle. Man versucht also durch diese Maßnahmen die spezifische Leistung bzw. das spezifische Drehmoment, bezogen auf das Hubvolumen, zu steigern. Die Mitteldruckerhöhung – und die daraus resultierende Wirkungsgraderhöhung – geschieht beispielsweise durch das Anbringen von Abgasturboladern, welche den Brennraum mit erhöhtem Luftvolumen befüllen – mehr dazu im Kapitel 2.2.3. Eine einfache Möglichkeit des Downsizings ist die lastabhängige Zylinderabschaltung bei der sich einzelne Zylinder ausschalten (die Ventile werden i.d.R. geschlossen, es erfolgt keine Kraftstoffzufuhr oder Zündung) und diese somit nicht zum arbeitenden Motorvolumen gezählt werden können - mehr dazu in Kapitel 2.2.6. Es wird schlussendlich also versucht die positiven Verbrauchseigenschaften kleinerer Motoren mit der Leistung größerer zu kombinieren bzw. bei geringeren Verbräuchen die spezifische Leistung zu erhöhen.<sup>33</sup>

Die nachstehende Grafik verdeutlicht den eingangs beschriebenen Trend zum Downsizing und den daraus folgenden Erhöhungen der spezifischen Leistungen der Motoren. Deutlich erkennbar ist der spezifische Leistungssprung von knapp über 15 kW von freisaugenden im Vergleich zu aufgeladenen Ottomotoren.

---

<sup>33</sup> Vgl. Golloch, R.: Downsizing bei Verbrennungsmotoren: Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung, Berlin: Springer, 2005, S. 67ff



**Abbildung 12: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Motorleistung<sup>34</sup>**

Ein anschauliches Beispiel für Downsizing ist im aktuellen BMW i8 vorzufinden: Ausgegangen wird hier von einem Benzin 6-Zylinder Reihenmotor mit drei Litern Hubraum und einer Leistung von 170 kW. Dieser Grundmotor wurde im i8, bei gleichbleibender Leistung von 170 kW, praktisch halbiert (1,5 Liter 3 Zylinder) und turboaufgeladen – klarerweise fanden auch andere technische Eingriffe wie z.B. Anpassung von Hub und Bohrung des Zylinders, statt.<sup>35</sup> Somit lässt sich sehr rasch das Potenzial von Downsizing-Maßnahmen erkennen. Der gewichtigste Grund hierfür sind die möglichen Verbrauchsminderungen von 10% - 30% im Vergleich zu klassischen Motorkonzepten.<sup>36</sup>

### **2.2.2.2 Vorteile und Nachteile des Downsizings**

Abschließend sollen noch Vor- als auch Nachteile beschrieben werden, welche den Einsatz von Downsizing berechtigen oder hemmen.

Neben den potenziellen Verbrauchseinsparungen von 10% bis 30% (siehe oben) sind Downsizing-Maßnahmen auch aus Gründen des Packagings für Hersteller von großem Interesse. Die kleineren Motoren erlauben einen einfacheren Einbau, kleinere Motorräume, mehr Platz für Nebenaggregate und sind durch den geringeren Materialverbrauch auch in der Herstellung meist günstiger. Andererseits darf nicht vergessen werden, dass

<sup>34</sup> Bildquelle: Golloch, R.: Downsizing bei Verbrennungsmotoren: Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung, Berlin: Springer, 2005, S. 68

<sup>35</sup> Vgl. BMW.at: Technische Daten: i8, <https://www.bmw.at/de/all-models/bmw-i/i8-coupe/2017/technische-daten.html#tab-0> [Zugriff: 26.02.2018]

<sup>36</sup> Vgl. Golloch, R.: Downsizing bei Verbrennungsmotoren: Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung, Berlin: Springer, 2005, S. 71



für den effektiven Betrieb zusätzliche Bauteile wie z.B. Turbolader notwendig sind, welche die Komplexität zunehmen lassen. Auch zusätzliche thermische als auch mechanische Belastungen der Motorinnereien durch den erhöhten Mitteldruck aufgrund der Aufladung sind als nachteilig zu verbuchen. Aus Kundensicht ist beim Thema Downsizing vor allem die Akzeptanz ein häufig diskutiertes Risiko. Die meist verringerte Zylinderanzahl bzw. Hubraum beeinflussen das Anfahrtdrehmoment, das dynamische Verhalten als auch die Akustik des Motors negativ.<sup>37</sup> Besonders im Premiumsegment kann es deshalb, trotz potenzieller Verbrauchseinsparungen, zu Akzeptanzschwierigkeiten kommen – als Beispiel kann hier die Mercedes S-Klasse genannt werden, deren Vierzylinder Diesel in der letzten Generation von den Kunden kaum akzeptiert wurde. Lieber griffen diese zu 6-, 8- oder sogar 12-Zylinder Modellen – aus Kundensicht eher angemessen für diese Fahrzeugklasse. BMW bietet diesbezüglich mit dem aktuellen 740e ein ähnliches Beispiel – die mit einem Hybridantriebskonzept, bestehend aus einem Vierzylinder Turbobenziner sowie Elektromotor, ausgestattete Luxuslimousine versucht durch Effizienz die Gunst der wählerischen Kundschaft zu erlangen.<sup>38</sup> Leider können die modernen kleineren Triebwerke noch nicht die Souveränität, das daraus folgende Fahrgefühl als auch den Klang eines größeren Aggregats ersetzen.

### 2.2.3 Turbotechnologie

Eines der wichtigsten Werkzeuge zur Effizienzsteigerung im modernen Motorenbau ist die Turbotechnologie. Nach welchem Prinzip diese funktioniert, welche verschiedenen Ansätze zum Einsatz es gibt bzw. welche Vor- und Nachteile diese mit sich bringen, soll in diesem Teil der Arbeit erläutert werden.

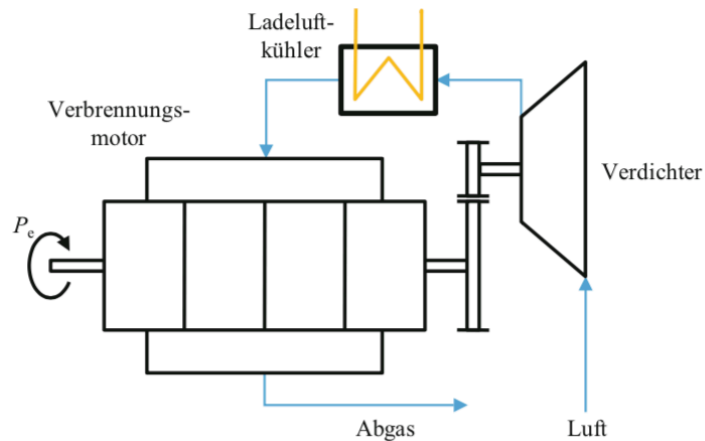
#### 2.2.3.1 Grundlagen und Funktionsprinzip von Turbokompressoren

Grundsätzlich können in mechanische und thermodynamische Aufladungsverfahren unterschieden werden – schematische Darstellungen in den beiden nachstehenden Abbildungen. Ersteres wird durch einen, von der Kurbelwelle mittels Riemen angetriebenen, Kompressor (meist Schraubenkompressor) bewerkstelligt. Daraus geht ebenso hervor, dass die anfangs abgegebene Kurbelwellenleistung an das Getriebe durch die zusätzliche Notwendigkeit des Antriebes des Kompressors gemindert wird - sobald der Ladedruck, mit daraus folgender Leistungssteigerung, einsetzt, werden allerdings die Antriebsverluste kompensiert.

---

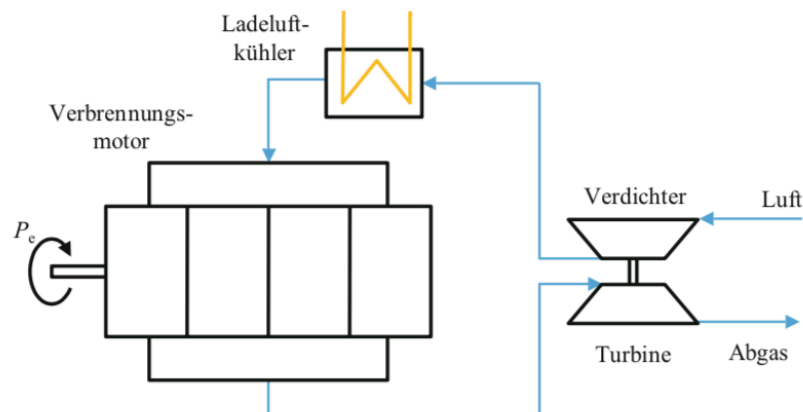
<sup>37</sup> Vgl. Van Basshuysen, R.: Fahrzeugentwicklung im Wandel: Gedanken und Visionen im Spiegel der Zeit, 1. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010, S. 56f

<sup>38</sup> Vgl. BMW.at: BMW 7er Limousine: Ein elektrisierendes Fahrgefühl – Der BMW 740e Plug-in-Hybrid, <https://www.bmw.at/de/all-models/7-series/sedan/2015/ipperformance.html> [Zugriff: 26.02.2018]



**Abbildung 13: Schematische Darstellung einer mechanischen Aufladung<sup>39</sup>**

Eine technisch raffiniertere Lösung ist die thermodynamische Aufladung mittels Abgasturboladern (ATL), bei denen das Kompressorrad durch die direkte Verbindung zu einer, vom Abgas angetriebenen, Abgasturbine angetrieben wird. Im weiteren Verlauf wollen wir uns auf die Aufladung mittels ATL fokussieren, da diese die häufigste anzutreffende Aufladungsmethode bei modernen PKW ist.<sup>40</sup>



**Abbildung 14: Schematische Darstellung einer thermodynamischen Aufladung mit ATL<sup>41</sup>**

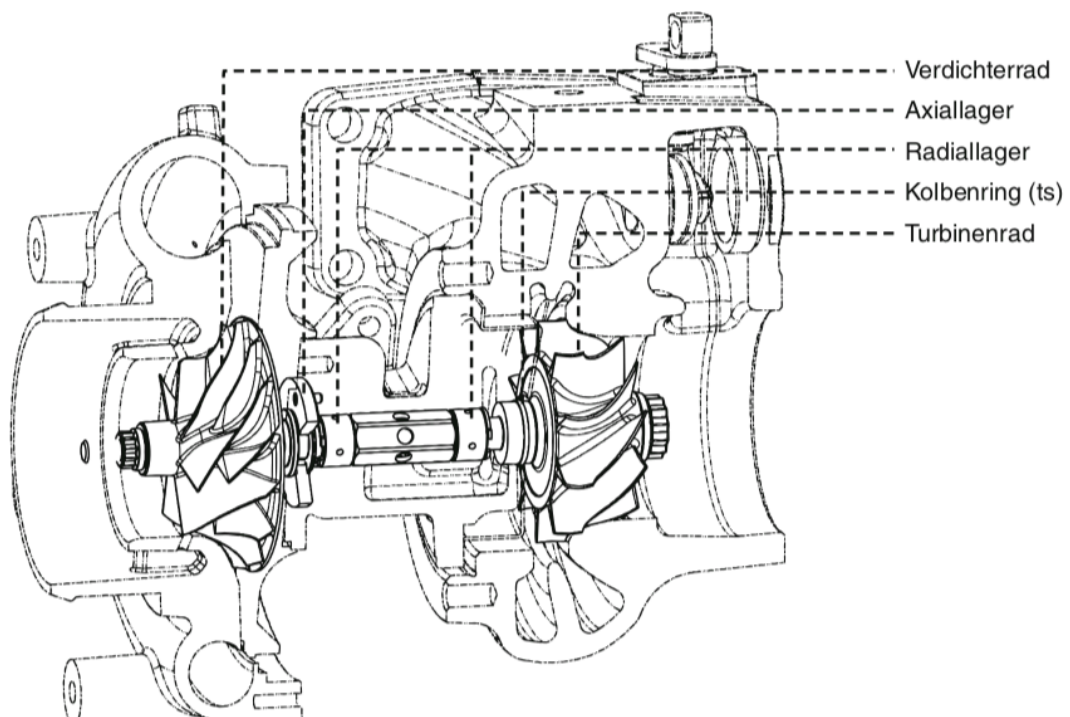
<sup>39</sup> Bildquelle: Schreiner, K.: Basiswissen Verbrennungsmotor: Fragen – Rechnen – Verstehen – Bestehen, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 250

<sup>40</sup> Vgl. Van Basshuysen, R., Schäfer, F. (Hrsg.): Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Perspektiven, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 609ff

<sup>41</sup> Bildquelle: Schreiner, K.: Basiswissen Verbrennungsmotor: Fragen – Rechnen – Verstehen – Bestehen, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 250

Grundsätzlich liegt die Funktion der Aufladung in der Erhöhung des Mitteldruckes, durch zugeführten Ladedruck, im Brennraum zur Erzielung einer Leistungssteigerung – siehe Downsizing. Aber wie funktioniert ein ATL prinzipiell?

Ein ATL besteht aus einer Welle, am Ende selbiger findet man auf einer Seite ein Turbinenrad, auf der anderen ein Kompressorrad. Das Turbinenrad im Abgasgehäuse wird durch den Abgasstrom aus den Zylindern angetrieben, weshalb sich die Welle bei laufendem Motor zu drehen beginnt. In weiterer Folge führt dies dazu, dass das Kompressorrad beginnt frische Luft im Frischluftgehäuse anzusaugen und zu komprimieren. Bei der Kompression der Luft kommt es allerdings zu einer Erwärmung selbiger, was wiederum die Dichte der Ansaugluft verringert. Die Dichtereducierung würde schlussendlich zu geringeren Mitteldrücken führen, weshalb es notwendig ist die Ladeluft zu kühlen um dichtere Luft in den Brennraum zu leiten. Je mehr kältere Ladeluft in den Brennraum eingespeist werden kann, umso größer wäre das entspannte Volumen selbiger – dieses wäre bei höheren Temperaturen umgekehrt geringer. Um eine Mitteldrucksteigerung zu erreichen, muss es also das Ziel des ATL sein, so viel wie möglich kühle Luft in den Brennraum zu leiten. Die notwendige Ladeluftkühlung geschieht heutzutage entweder mit, in den Fahrtwind gerichteten, Luft-Ladeluftkühlern oder Wasser-Ladeluftkühlern, welche dafür Sorge tragen den Zylinder mit möglichst kalter verdichteter Luft zu beschicken.



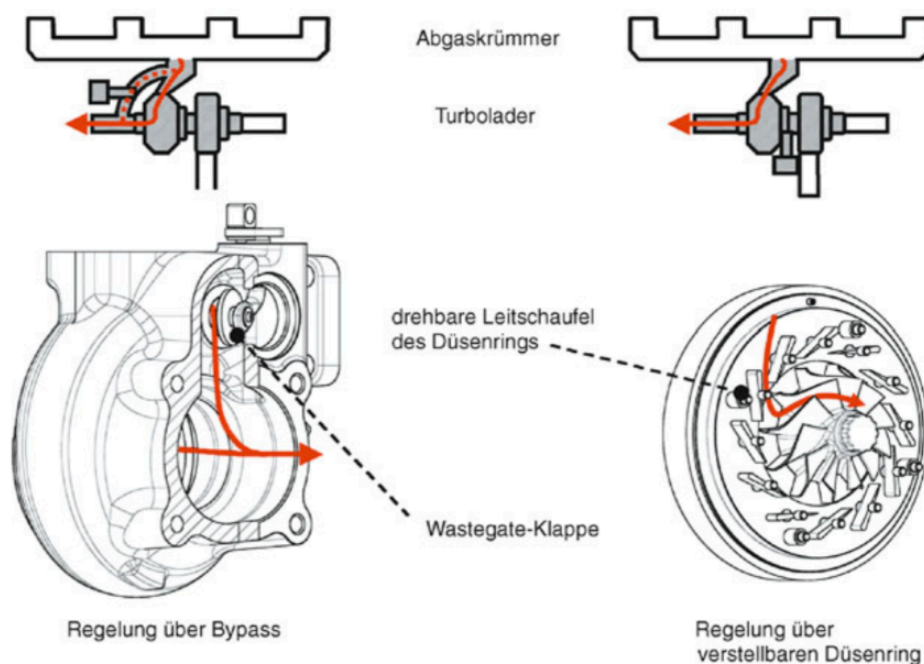
**Abbildung 15: Schnittdarstellung ATL<sup>42</sup>**

---

<sup>42</sup> Bildquelle: Pischinger, S., Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 407

In der vorhergehenden Schnittdarstellung erkennt man deutlich auf der linken Seite das Verdichter- bzw. Kompressorrad und gegenüberliegend rechts das Turbinenrad, welches durch den Abgasstrom angetrieben wird. Die radiale Wellenlagerung erfolgt durch zwei Radiallager, die axiale Positionssicherung geschieht durch ein Axiallager und einen Kolbenring. Die Schmierung ist durch zugeführtes Öl an den Lagerstellen gewährleistet – wobei die Förderung von der, vom Motor angetriebenen, Ölpumpe übernommen wird.

Selbstredend benötigt man für den Betrieb von ATL auch ein Regelungssystem um ein zufriedenstellendes Ansprechverhalten, als auch den Schutz der empfindlichen, schnell-drehenden Bauteile zu garantieren. Hierbei ist es üblich ein sogenanntes Bypassventil, oder auch Wastegate genannt, im Abgasgehäuse zu installieren, welches bei Bedarf einen Teil des Abgases an dem Turbinenrad vorbeileiten kann. Dies verhindert, dass zu starke Abgasdrücke das Turbinenrad beschädigen oder es zu Überdrehern des ATL kommt. Die Öffnung der Wastegateklappe wird über ein Verbindungsgestänge, welches über eine Druckmembran bzw. elektronisch gesteuert ist, vorgenommen. Eine zweite Variante zur Regelung der Abgasturbine ist die sogenannte VTG Steuerung – mehr dazu folgt in den anschließenden Kapiteln.<sup>43</sup> Hier im Anschluss abgebildet: links eine Wastegate-, rechts eine VTG-Regelung.



**Abbildung 16: Wastegateregulierung (links) und VTG Regulierung (rechts)<sup>44</sup>**

<sup>43</sup> Vgl. Pischinger, S., Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 409

<sup>44</sup> Bildquelle: Pischinger, S., Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 409

Die Problematik bei starren Turbosystemen sind das, aus den Anfängen der Turbotechnologie bekannte, Turboloch als auch der geringere effektiv nutzbare Drehzahlbereich. Dies resultiert daraus, dass zum effektiven Betrieb des Kompressorrades eine gewisse Drehzahl des Turbinenrades erreicht werden muss. Geschieht dies, aufgrund eines zu geringen Abgasstromes, nicht kann keine wirksame Kompression stattfinden. Selbstverständlich wirkt sich nicht nur das Abgasvolumen auf das Ansprechverhalten aus – auch die konstruktive Gestaltung des gesamten Turboladers spielt eine immense Rolle. Dies beginnt bereits beim Abgaskrümmern – ist dieser nicht strömungsbegünstigend ausgeformt, verhindert dies ein schnelles Ansprechen des Turbinenrades. Ebenso zu beachten ist das Abgasgehäuse des Turboladers – ist dieses zu groß dimensioniert benötigt es sehr viel Abgasvolumen um dieses zu füllen und folglich die Welle anzutreiben. Auch die Turbinengeometrie, wie auch die Massen der Welle und beider Schaufelräder spielen eine bedeutende Rolle im Ansprechverhalten des ATL – bei hohen Massenträgheiten der drehenden Bauteile werden schlussendlich auch höhere Abgasdrücke mit größeren Impulskräften benötigt um eine merkbare Kompression zu erzielen.

Um dieses träge Verhalten von ATL zu kompensieren, sowie eine effektive Nutzbarkeit über ein breites Drehzahlpektrum zu gewährleisten, gibt es verschiedenste konstruktive Varianten der Bauteile selbst z.B. VTG, aber auch Betriebsstrategien wie beispielsweise die Aufladung mit mehreren ATL. Wie dies funktioniert wird in den folgenden Abschnitten behandelt.

### **2.2.3.2 Aufladung mit mehreren Turboladern**

Ein einzelner Turbolader hat oftmals den Nachteil, dass er nur für einen bestimmten Drehzahlbereich ausgelegt ist – klar kann eine VTG Regelung das Verhalten positiv beeinflussen, aber ein Turbolader der in allen Drehzahlbereichen gleich gut funktioniert existiert nicht. Um das Drehmomentverhalten eines Motors über das gesamte Drehzahlband, als auch das Ansprechverhalten des Motors positiv zu beeinflussen, gibt es Varianten mit mehreren Turboladern.

Die Registeraufladung beispielsweise verfügt i.d.R. über mindestens einen kleinen sowie einen großen ATL. Der kleinere sorgt im unteren Drehzahlbereich dafür, dass rasch ein Anstieg im Ladedruck, folglich auch im Mitteldruck in der Brennkammer, geschieht, was wiederum einen rascheren Anstieg des Abgasvolumens mit sich bringt – währenddessen ist der große ATL abgeschaltet. Ab einem gewissen Drehzahlbereich wird der größere ATL zugeschaltet und sorgt im weiteren Drehzahlverlauf, aufgrund des gelieferten Abgasvolumens, für ausreichend Ladedruck. Die Regelung erfolgt über einen Klappenmechanismus welcher die verschiedenen Strömungswege freigibt oder sperrt. Nachteilig bei dieser Bauweise ist der zusätzliche Platzbedarf, sowie die empfindliche Regelklappenmechanik sowie komplexe Steuerung – positiv zu verzeichnen ist das bessere Ansprechver-

halten im Vergleich zu einer einstufigen Aufladung sowie das breitere nutzbare Drehmomentenband.<sup>45</sup>

Eine andere Möglichkeit, um das Ansprechverhalten zu verbessern, ist das Anbringen mehrerer gleich kleiner Turbolader. Besonders bei V-Motoren eignet sich dies sehr gut, da ein ATL jeweils nur einer Bank zugeordnet ist. So wird bei einem V8-Motor beispielsweise ein Turbolader von den vier Zylindern einer Bank befeuert. Durch den üblicherweise größeren Hubraum von V-Motoren sorgen auch bereits kleinere ATL für eine ausreichende Leistungssteigerung – schlussendlich handelt es sich um zwei miteinander verbundene turboaufgeladene Vierzylindermotoren, im Falle des V8.

Im modernen Automobilbau lässt sich deutlich ein Trend zur Aufladung mit mehreren Turboladern erkennen – besonders im Bereich ab den mittleren Fahrzeugklassen mit größeren Motorräumen ist aufgrund von Packagingvorteilen im Motorraum eine Aufladung mit mehreren ATL leichter realisierbar. Bei kleineren Fahrzeugen bis hin zur Golfklasse ist es noch eher unüblich mehrere ATL anzubringen.

### **2.2.3.3 Variable Turbinen Geometrie (VTG) Turbolader**

Die Variable Turbinen Geometrie (VTG) will besonders das Ansprechverhalten verbessern, aber auch die Breite des nutzbaren Drehzahlbandes erhöhen. Wie bereits angesprochen ist besonders der untere Drehzahlbereich, mit seinem relativ geringen Abgasvolumenstrom, für ATL teilweise problematisch. Bei ATL ohne VTG ist der Richtungskanal zur Abgasturbine in seinem Querschnitt unveränderlich – würde dieser seinen Strömungsquerschnitt verjüngen können, so würde die Strömungsgeschwindigkeit des Abgases zur Turbine zunehmen.<sup>46</sup>

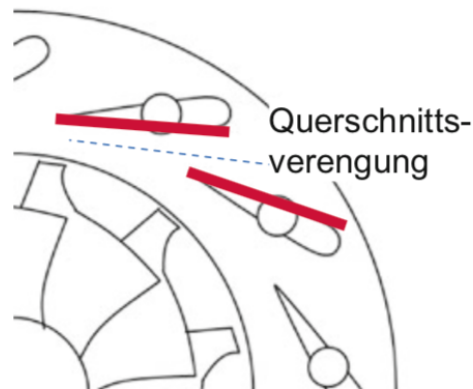
Genau dieses Prinzip verfolgt die VTG Regelung indem sie bei geringen Motordrehzahlen den Leitschaufelkranz flach stellt, somit wird der Anströmquerschnitt verringert (siehe Folgeabbildung), daraus folgend die Abgasgeschwindigkeit zur Turbine gesteigert (Düsenwirkung) und ein rascheres Ansprechen der Turbine gewährleistet. Sobald das Abgasvolumen ausreichend ist, stellen sich die Leitschaufeln steiler zur Turbine und leiten den Abgasstrom direkt gerichtet auf die einzelnen Schaufelblätter. Die VTG Regelung sorgt schlussendlich für früheres, besseres Ansprechverhalten des ATL – allerdings ist der technische Aufwand im Vergleich zu ATL ohne VTG um einiges höher, besonders die hohen Abgastemperaturen (ca. 1050°C) bei Ottomotoren können dem Mechanismus zu

---

<sup>45</sup> Vgl. Van Basshuysen, R., Schäfer, F. (Hrsg.): Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Perspektiven, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 626ff

<sup>46</sup> Bei einem konstanten Volumenstrom nimmt die Strömungsgeschwindigkeit mit abnehmenden Strömungsquerschnitt zu und umgekehrt mit zunehmenden Strömungsquerschnitt ab.

schaffen machen. Aufgrund dessen ist das System bei Ottomotoren erst seit 2006 im Einsatz (Porsche Turbo 996), bei Dieselmotoren mit geringeren Abgastemperaturen wurde es bereits 10 Jahre früher angewandt.<sup>47</sup>



**Abbildung 17: Querschnittsverengung bei VTG ATL (Düsenwirkung)<sup>48</sup>**

#### **2.2.3.4 Elektrische Turbolader**

Ein weiterer Ansatz zur Nutzenerhöhung von ATL ist die Unterstützung mittels elektrischer Energie. Dies kann entweder durch einen unmittelbar an der Welle montierten Elektromotor geschehen, oder über elektrische Zusatzverdichter die den Ladedruck direkt erhöhen. Bei ersterer Variante ist die hohe thermische Belastung nicht wegdiskutierbar, ebenso wie die Komplexität beider Varianten. Des Weiteren ist eine ausreichende elektrische Leistung für den Betrieb der Elektromotoren notwendig, welche allerdings vom 12-Volt-Bordnetz nicht bereitgestellt werden kann – zusätzliche elektrische Speicher wären dafür ein Lösungsansatz. Was die Technologie attraktiv macht sind zum einen das damit ermöglichte sehr dynamische Verhalten des ATL, sowie dessen einfache Regelbarkeit. Insgesamt scheitert dieses Konzept momentan allerdings noch an technischen Problemen wie der thermischen Belastung aller Komponenten sowie den aufwendigen Zusatzbauteilen wie der integrierte Elektroantrieb an der Welle des ATL. Diese können die positiven Auswirkungen auf das Verhalten der Aufladung aus heutiger Sicht noch nicht wett machen.<sup>49</sup>

<sup>47</sup> Vgl. Merker, G., Teichmann, R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise – Simulation – Messtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 425f

<sup>48</sup> Bildquelle: Merker, G., Teichmann, R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise – Simulation – Messtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 425

<sup>49</sup> Vgl. Merker, G., Teichmann, R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise – Simulation – Messtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 439

### **2.2.3.5 Vorteile und Nachteile von Turboaufladungen**

Der Vorteil der Aufladung mit ATL ist definitiv im Leistungszuwachs des Motors zu sehen. Dies ermöglicht das Downsizing von Antrieben bei gleichbleibenden Fahrleistungen und kann so zu Verbrauchsminderungen von 10% bis 30% bei gleichbleibenden Fahrleistungen führen (siehe Downsizing).

Nachteilig zu notieren sind die steigende Komplexität durch zusätzliche Bauteile sowie Regelemente bzw. Steuerungstechnik, was einen steigenden Platzbedarf im Motorraum mit sich führt. Dies kann u.U. zu Problemen beim Packaging des Motorraumes führen. Ebenso steigt durch den produzierten Ladedruck – und die damit verbundene Mitteldruck-erhöhung im Brennraum – die Belastung auf wichtige Motorbauteile wie z.B. Kolben, Pleuelstangen oder Kurbelwellen, was zu einer, im Vergleich zu Saugmotoren, geringeren zu erwartenden Lebensdauer des Antriebes führen kann. Die Langlebigkeit ist allerdings auch stark abhängig von der Pflege des Benutzers, welche bei Turbomotoren sehr wichtig ist. So ist es beispielsweise zu vermeiden dem Motor im kalten Zustand seine volle Leistung abzuverlangen, ihn mit niedrigem Ölstand zu betreiben (keine ausreichende Schmierung der schnelllaufenden ATL Welle gewährleistet) oder auch das sofortige Abstellen des Motors nach der Fahrt ohne einer kurzen Nachlaufphase. Besonders letzteres kann teils relativ rasch zu Turboschäden (meist Lagerschäden) führen, da nach dem Abstellen des Motors die Ölpumpe keine Schmierung mehr vornimmt und somit die noch drehende Welle des ATL einem höheren Verschleiß ausgesetzt ist. Als Endverbraucher oftmals auch ein entscheidendes Kriterium ist der zu tankende Kraftstoff –bei Benzin Turbomotoren sollte aufgrund der höheren Verdichtung grundsätzlich zu teurerem Super Plus 98 gegriffen werden. Moderne Motoren können sich zwar auf unterschiedliche Kraftstoffe einstellen z.B. Super 95, sind allerdings nicht in der Lage ihr volles Leistungs- als auch Effizienzpotenzial auszuschöpfen, wenn sie nicht mit dem für sie ausgelegten Treibstoff agieren.

## **2.2.4 Direkteinspritzung**

### **2.2.4.1 Grundlagen und Funktionsprinzip der Direkteinspritzung**

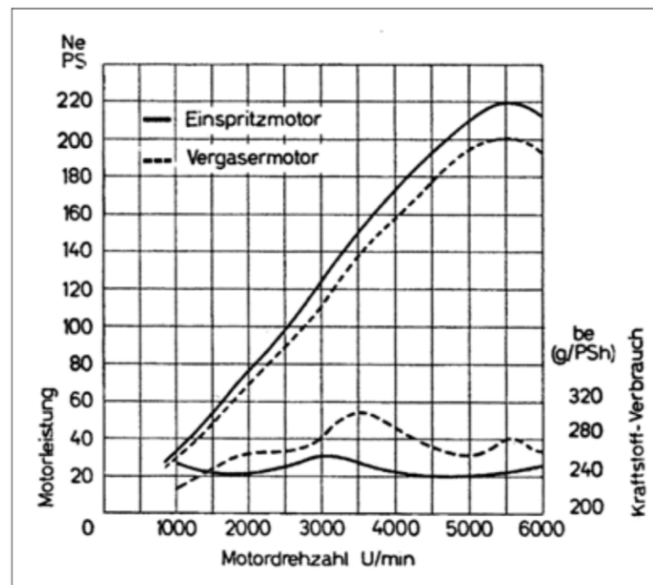
Bislang wurden verschiedene Ansätze, welche allerdings nur indirekt mit der Treibstoffzufuhr zu tun haben, diskutiert. Diese wichtige Stellschraube, sowie ihre Regelbarkeit, ist seit geraumer Zeit schon in den Fokus der Automobilindustrie gerückt. Ziel der Hersteller ist es, nur so viel Kraftstoff wie nötig in den Brennraum einzuspritzen und die Verluste so gering wie möglich zu halten um den Gesamtverbrauch zu minimieren – mittels moderner Technologien wie der Direkteinspritzung sowie Regelelektronik soll die Zufuhrmenge punktuell rasch variierbar sein um ein Optimum an Effizienz und Leistung anzustreben.

Grundsätzlich gibt es mehrere Varianten um den Kraftstoff dem Zylinder zuzuführen: seit Erfindung des Automobils war der Vergaser stark vertreten, welcher die Ansaugluft direkt mit Benzin vermischte, und dieses Gemisch dann dem Motor zuführte – dieses Prinzip ist heute, außer bei Oldtimern, nicht mehr anzutreffen. Die Systeme, welche man heute fin-



den kann, sind entweder die Saugrohreinspritzung oder die Direkteinspritzung – wo die Unterschiede liegen wird im Folgeabschnitt behandelt. Erstmal soll das Funktionsprinzip der heute weit verbreiteten Direkteinspritzung erläutert werden.

Wie der Name es bereits vermuten lässt, wird bei der Direkteinspritzung der Kraftstoff direkt in den Zylinder eingebracht. Die ersten Anwendungen im PKW Bereich bei Otto-Benzinmotoren erfolgten Mitte des letzten Jahrhunderts im Mercedes Benz 300 SL, wobei es damals das Ziel war über den gesamten Drehzahlverlauf einen Leistungszuwachs zu generieren – wie im Leistungsdiagramm weiter unten erkennbar waren es rund 10% mehr Leistung bei niedrigerem Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum Vergasermotor. Bereits damals ließen sich die Vorteile der Direkteinspritzung erkennen, doch aufgrund niedriger Treibstoffpreise war das Interesse an der relativ komplexen Technologie gering – die Entwicklungen fokussierten sich vermehrt auf die Saugrohreinspritzung, weshalb die Bestrebungen nach Direkteinspritzungssystemen ab Mitte der 1960er Jahre allmählich verschwanden.<sup>50</sup>

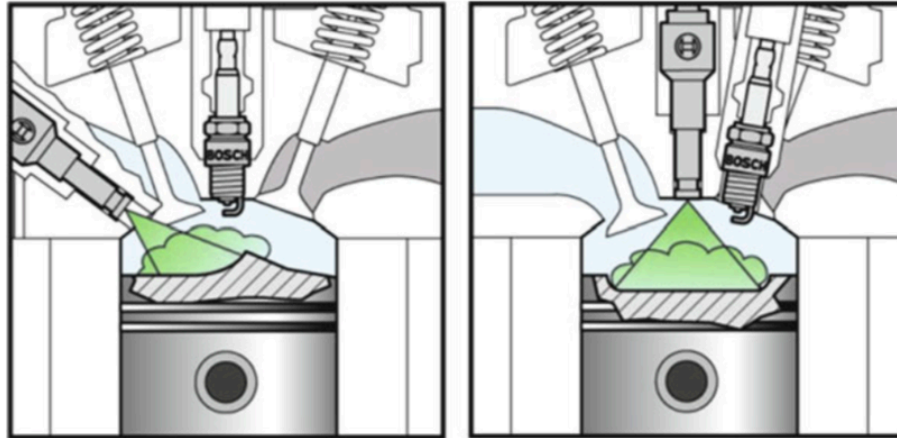


**Abbildung 18: Leistungsdiagramm 300 SL (Vergaserbetrieb/Direkteinspritzung)<sup>51</sup>**

Dadurch, dass der Kraftstoff direkt in den Brennraum eingeführt wird, ergeben sich Freiheitsgrade wie z.B. die Einspritzlage (seitlich oder mittig – siehe Folgeabbildung), Nähe zur Zündkerze oder Einspritzhäufigkeit, welche den Betrieb des Motors positiv beeinflussen, sowie daraus folgend die Effizienz steigern können.

<sup>50</sup> Vgl. Van Basshuysen, R. (Hrsg.): Ottomotor mit Direkteinspritzung: Verfahren – Systeme – Entwicklung – Potenzial, 3. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 20

<sup>51</sup> Bildquelle: Van Basshuysen, R. (Hrsg.): Ottomotor mit Direkteinspritzung: Verfahren – Systeme – Entwicklung – Potenzial, 3. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 20



**Abbildung 19: Lage der Einspritzventile<sup>52</sup>**

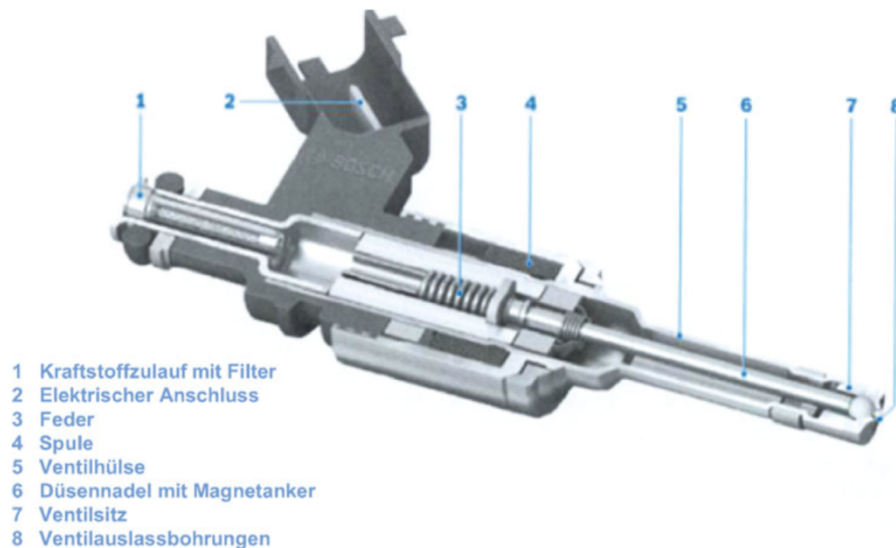
Des Weiteren ergibt sich durch die Verdampfung des Treibstoffes im Brennraum zusätzlich noch eine Kühlwirkung welche eine höhere Kompression, durch die geringere Wahrscheinlichkeit zur Selbstentzündung bzw. Klopfneigung, und daraus resultierende höhere Mitteldrücke, erlaubt. Der Kraftstoff wird durch das Öffnen des Magnetventiles der Einspritzdüse – Aufbau einer Einspritzdüse ist in Abb. 20 ersichtlich - mit Drücken bis über 200 bar in den Brennraum zerstäubt.<sup>53</sup>

Das Ziel ist es, die Kraftstoffmenge so fein wie möglich für die verschiedenen Anforderungsprofile zu dosieren sowie zu variieren – entweder kann im Homogenbetrieb, welcher die maximale Leistung des Motors freisetzen soll, der Kraftstoff möglichst gleichmäßig im gesamten Brennraum verteilt werden, oder aber im Schichtladebetrieb, für geringe Lasten, bei dem angestrebt wird den Kraftstoff vor die Zündkerze einzuspritzen (im Brennraum herrscht ein mageres Gemisch). Bei ersterem Verfahren beginnt der Einspritzvorgang bereits im Ansaugtakt des Motors um ein möglichst homogenes Gemisch zu erzielen, bei letzterem öffnet sich das Einspritzventil erst in der Verdichtungsphase um die dort vorliegenden Strömungsverhältnisse des sich aufwärtsbewegenden Kolbens zu nutzen um das Gemisch vor der Zündkerze zu positionieren.<sup>54</sup>

<sup>52</sup> Bildquelle: Merker, G., Teichmann, R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise – Simulation – Messtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 351

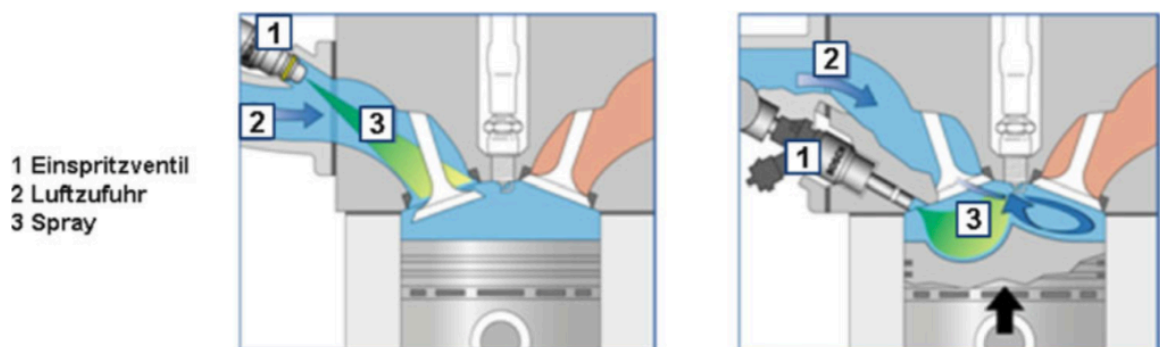
<sup>53</sup> Vgl. Merker, G., Teichmann, R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise – Simulation – Messtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 343ff

<sup>54</sup> Vgl. Merker, G., Teichmann, R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise – Simulation – Messtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 343ff

Abbildung 20: Aufbau Hochdruck-Einspritzventil<sup>55</sup>

#### 2.2.4.2 Direkteinspritzung im Vergleich zu Saugrohreinspritzung

Die nachstehende Abbildung verdeutlicht den konstruktiven Unterschied zwischen Saugrohreinspritzung (äußere Gemischbildung) und der vorher betrachteten Direkteinspritzung (innere Gemischbildung).

Abbildung 21: Vergleich Saugrohreinspritzung zu Direkteinspritzung<sup>56</sup>

Bei der Saugrohreinspritzung wird der Kraftstoff beim Ansaugtakt direkt vor das Einlassventil in den Einlasskanal eingeführt – somit erfolgt die Gemischbildung außerhalb des Zylinders. Daraus folgt, dass immer ein annähernd homogenes Gemisch im Brennraum herrscht – eine Schichtladung wie bei der Direkteinspritzung ist nicht möglich. Die Saug-

<sup>55</sup> Bildquelle: Merker, G., Teichmann, R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise – Simulation – Messtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 347

<sup>56</sup> Bildquelle: Merker, G., Teichmann, R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise – Simulation – Messtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 332

rohreinspritzung ist aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit (keine Hochdruckpumpen notwendig) noch immer in vielen Segmenten vertreten. Allerdings werden aufgrund strenger Schadstoffanforderungen Downsizingkonzepte seitens der Hersteller immer weiter favorisiert, weshalb die Saugrohreinspritzung früher oder später von Direkteinspritzsystemen verdrängt werden wird. Zur Verdeutlichung dessen soll erwähnt sein, dass das Downsizingpotenzial bei Saugrohreinspritzung rund 25% beträgt – was einem Kraftstoffverbrauch von 10% bis 12% entspricht – hingegen Direkteinspritzungssysteme Downsizingpotenziale von 40%, und somit theoretische Kraftstoffsenkungspotenziale von 15% bis 19% aufweisen.<sup>57</sup>

#### **2.2.4.3 Vorteile und Nachteile der Direkteinspritzung**

Vorteilhaft bei Direkteinspritzungssystemen ist die hohe Variabilität der Gemischbildung für einzelne Lastzustände mit dem daraus resultierenden Downsizingpotenzial von 40% sowie möglicher Kraftstoff- als auch Schadstoffeinsparungen.

Negativ zu Buche schlagen der, im Vergleich zur Saugrohreinspritzung, höhere technische Aufwand durch Hochdruckpumpen und Hochdruckventilkörper, sowie das Platzieren eines empfindlichen Hochdruckbauteiles innerhalb des Brennraumes mit seinen hohen Betriebstemperaturen /-drücken. Im Falle eines Defektes der Hochdruckventilkörper sind die Austauschkosten der komplexen Bauteile ebenfalls höher, als bei Saugrohreinspritzventilen.

#### **2.2.5 Variable Nockenwellenverstellung**

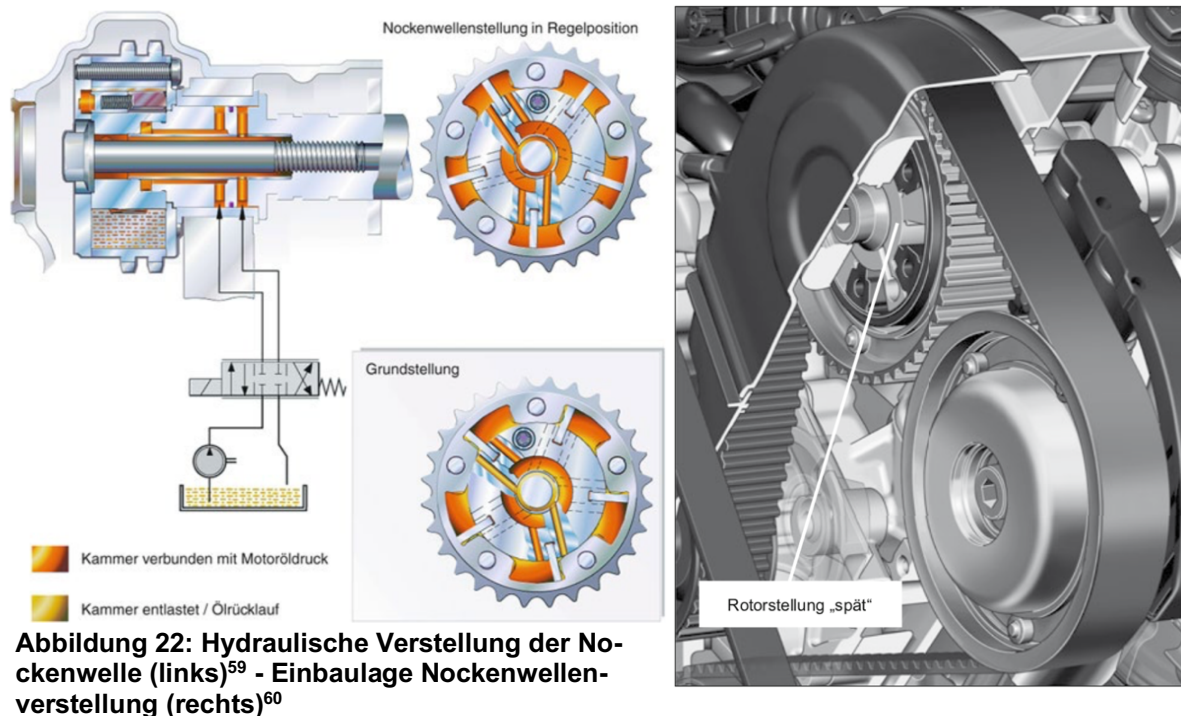
Zu den Aufgaben des Ventiltriebes allgemein gehört es den Ladungswechsel im Verbrennungsprozess zu regeln. Dies geschieht durch die Ventile (Ein- sowie Auslassventile), als auch die Nockenwelle, welche von der Kurbelwelle angetrieben wird. Dies bedeutet auch, dass ein effizienter Ventiltrieb den Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors erhöhen kann. Im Speziellen, soll sich dieser Abschnitt mit variablen Nockenwellenverstellungen beschäftigen, welche eine Variation der Ventilfreiheitsgrade ermöglicht und so ideale Ladungswechsel, mit daraus folgenden Wirkungsgradsteigerungen sowie Verminderungen von Kraftstoffverbrauch als auch Schadstoffausstoß, gewährleistet.<sup>58</sup>

---

<sup>57</sup> Vgl. Merker, G., Teichmann, R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise – Simulation – Messtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 331ff

<sup>58</sup> Vgl. MAHLE GmbH (Hrsg.): Ventiltrieb: Systeme und Komponenten, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 1ff

### 2.2.5.1 Funktionsprinzip variabler Nockenwellenverstellungen



**Abbildung 22: Hydraulische Verstellung der Nockenwelle (links)<sup>59</sup> - Einbaulage Nockenwellenverstellung (rechts)<sup>60</sup>**

Wie bereits in 2.2.1.1 erkannt, ist die Aufgabe der Nockenwellen das Öffnen und Schließen der Ein- als auch Auslassventile des Zylinders um den dortigen Ladungswechsel möglich zu machen. Um diesen je nach Lastsituation variabel zu gestalten, ist eine Verstellmöglichkeit der Ventile durch die Nockenwelle notwendig – d.h. der Öffnungszeitpunkt, die Öffnungsdauer, als auch der Öffnungsweg sollen veränderbar sein um die optimale Leistungsausbeute bzw. Effizienz zu erhalten. Es gibt Unmengen an verschiedenen Ansätzen zur Umsetzung eines variablen Ventiltriebes, seien diese mechanisch über verschiedene Umlenk- oder Kipphebel, bzw. elektrisch oder hydraulisch betätigte Verstelllemente. Zur Komplexitätsverringerung wird nur die häufig angewandte Hydrauliklösung, welche zur inkrementellen Verstellung der Nockenwelle, im Vergleich zum antreibenden Zahnkranz, welcher starr über Ketten oder Riemen mit der Kurbelwelle verbunden ist, näher betrachtet. Dieses Prinzip wird genutzt um die Öffnungszeiten zu verschieben oder zu überlappen (eine Änderung von Öffnungsdauer sowie Öffnungsweg werden meist mechanisch umgesetzt).

<sup>59</sup> Bildquelle: Van Basshuysen, R., Schäfer, F. (Hrsg.): Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Perspektiven, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 298

<sup>60</sup> Bildquelle: Van Basshuysen, R., Schäfer, F. (Hrsg.): Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Perspektiven, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 575

Wie in der vorhergehenden Abbildung ersichtlich, geschieht dies meist mittels verstellbarer Hydraulikelemente, welche eine Verdrehung der Nockenwelle zum Zahnkranz ermöglichen. Dabei werden einzelne Kammern mit Motoröl befüllt oder geleert um eine inkrementelle Änderung der Winkelposition der Nocken im Vergleich zum Zahnkranz durchzuführen – was schlussendlich eine Veränderung der Öffnungszeiten der Ventile bedeutet.

#### **2.2.5.2 Vorteile und Nachteile von variablen Nockenwellenverstellungen**

Der Otto Benzinmotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung kann durch die variable Nockenwellenverstellung noch mehr von seinem Leistungs- als auch Effizienzpotenzial ausschöpfen. Durch die variablen Öffnungs- und Schließungsmöglichkeiten können Restgase bei Volllast aus dem Zylinder ausgespült, als auch günstigere Drehmomentverhältnisse bei niedrigen Drehzahlen ermöglicht werden. Ebenso kann durch frühes Öffnen des Einlassventiles, besonders bei Turbomotoren, noch mehr Frischluftvolumen in den Brennraum eingeführt werden, mit dem Resultat einer besseren Verbrennung sowie Mitteldruckerhöhung.<sup>61</sup> Des Weiteren lassen sich durch den variablen Ventiltrieb bei den standardisierten Testzyklen merkbare Verbrauchseinsparungen (zwischen 5% und 10%)<sup>62</sup> erkennen, was besonders in Kombination mit weiteren Maßnahmen wie Downsizing und Aufladung mittels ATL vielversprechende Potenziale freischalten kann.

Nachteilig können bei diesen, teils hochkomplexen, Hydrauliksystemen die Störungsanfälligkeit von Pumpelementen, Steuerungselektronik oder Positionssensoren sein – ebenso gilt dies bei mechanischen Lösungen mit Kipphebeln, Umlenkrollen oder Exzentern welche beispielsweise aufgrund von Verschleiß in ihrer Funktion gestört sein können. Dies schlägt sich auch in möglichen höheren Reparaturkosten im Vergleich zu starren Ventiltriebsystemen nieder.

#### **2.2.6 Zylinderabschaltung**

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 Downsizing angemerkt, ist die Zylinderabschaltung (ZAS) eine einfache Möglichkeit des Downsizings. Durch das Stilllegen der einzelnen Zylinder im Teillastbereich zählen diese nicht mehr zum arbeitenden Motorhubvolumen (schematisch in Abb. 23 dargestellt) und stellen deshalb eine dynamische Downsizingmaßnahme – auch Displacement on Demand (DOD) genannt – dar. Üblicherweise wurden Zylinderabschaltungsmaßnahmen bei größeren Motoren (V8 aufwärts) eingesetzt, allerdings machen sich mittlerweile auch kleinere Aggregate diese Möglichkeit zur Verbrauchs- sowie

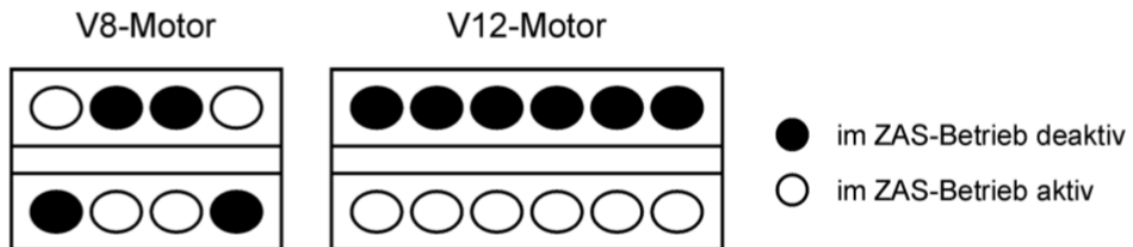
---

<sup>61</sup> Vgl. Van Basshuysen, R. (Hrsg.): Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung: Ottokraftstoffe – Erdgas – Methan – Wasserstoff, 4. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 204ff

<sup>62</sup> Vgl. Golloch, R.: Downsizing bei Verbrennungsmotoren: Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung, Berlin: Springer, 2005, S. 223

Schadstoffminimierung zu Nutze. Ziel ist es hierbei eine Verlagerung hin zu Betriebspunkten mit höheren Mitteldrücken, und somit höheren thermodynamischen Wirkungsgraden mit geringeren Kraftstoffverbräuchen, in den aktiven Zylindern zu erreichen.<sup>63</sup> Die genaue Erklärung anhand des Motorkennfeldes folgt im anschließenden Abschnitt.

### 2.2.6.1 Wirkungsweise der Zylinderabschaltung



**Abbildung 23: Aktivierte und deaktivierte Zylinder bei der Zylinderabschaltung<sup>64</sup>**

Mit Hilfe variabler Ventilsteuerungen ist es durchaus auch möglich, nur einzelne Ventile und somit in weiterer Folge auch einzelne Zylinder abzuschalten. Wenn ein Zylinder abgeschaltet werden soll, werden die Ein- als auch Auslassventile geschlossen, sowie Zündung und Kraftstoffeinspritzung unterbrochen. Die Ventile werden deshalb geschlossen, damit im deaktivierten Zylinder keine Pumpverluste (Ladungswechselerluste) zustande kommen, welche die erzielten Verbrauchseinsparungen wieder mindern würden. Die Pumpverluste ergeben sich dadurch, dass die Abwärtsbewegung des Kolbens Frischluft ansaugt, und diese später wieder ausgestoßen werden muss. Diese Pumparbeit wird durch das Schließen der Ventile verhindert – der Kolben pumpt somit auf einem Luftkissen. Sollten die Ventile nicht geschlossen werden, hätte dies ein Auskühlen der deaktivierten Zylinder, sowie eine Beeinträchtigung der Abgasregelung der aktiven Zylinder zur Folge. Letzteres entsteht dadurch, dass in den Abgasstrang, folglich bei den Lambda-Sonden, ein hoher Anteil an Frischluft eingeblasen wird.<sup>65</sup>

Die detaillierte technische Erklärung wie die Ventile tatsächlich deaktiviert werden können, würde, auch aufgrund ihrer Vielzahl, den Rahmen der Arbeit sprengen. Grundsätzlich sei erwähnt, dass solch eine Deaktivierung der Ventile beispielsweise durch schaltbare Ab-

<sup>63</sup> Vgl. Golloch, R.: Downsizing bei Verbrennungsmotoren: Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung, Berlin: Springer, 2005, S. 229f

<sup>64</sup> Bildquelle: Golloch, R.: Downsizing bei Verbrennungsmotoren: Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung, Berlin: Springer, 2005, S. 79

<sup>65</sup> Vgl. Golloch, R.: Downsizing bei Verbrennungsmotoren: Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung, Berlin: Springer, 2005, S. 229f



stützelemente, Rollenstößel, Schlepphebel oder Schiebenockensysteme realisiert werden kann.<sup>66</sup>

Nun zur Erklärung, warum sich die Mitteldrücke und somit der Wirkungsgrad erhöhen, wenn der Motor mit ZAS betrieben wird. Hierzu muss das nachstehende Motorkennfeld genauer analysiert werden:

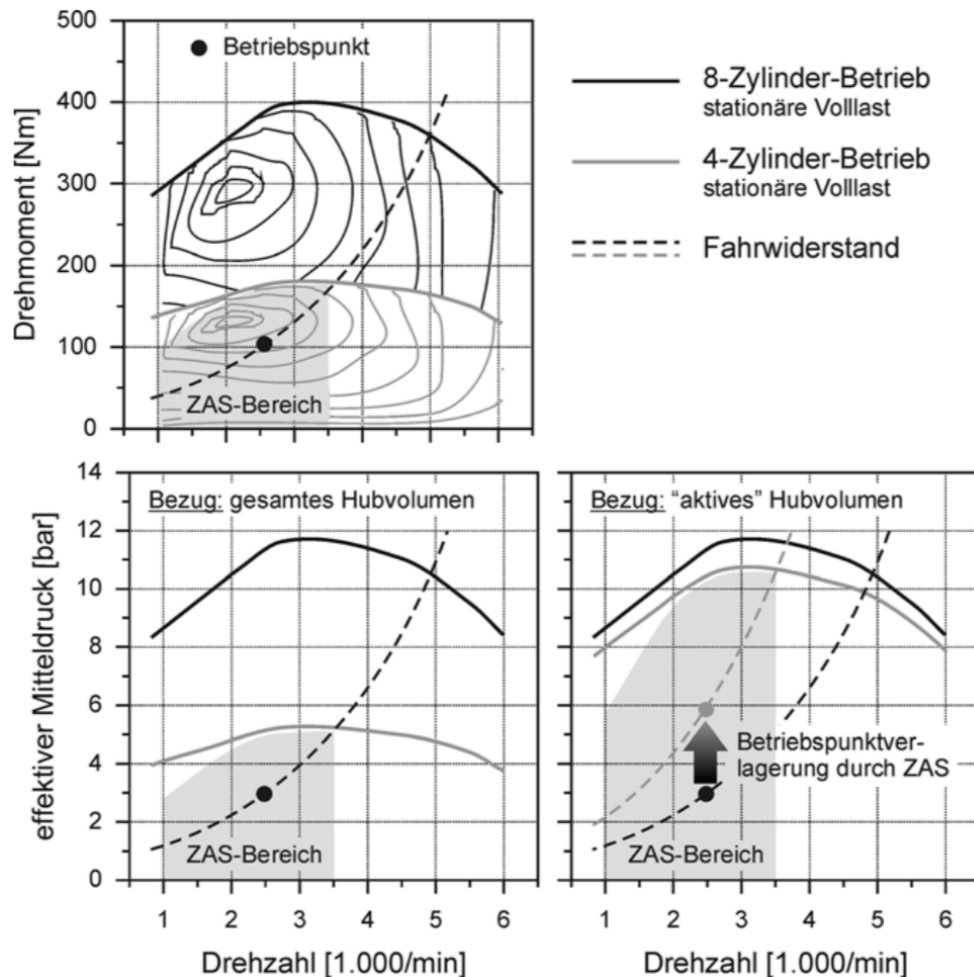


Abbildung 24: Motorkennfeld mit ZAS<sup>67</sup>

Im Drehmomenten-Drehzahl Kennfeld oben links sieht man die Drehmomentgrenzen der einzelnen Zylinderbetriebe – im 8-Zylinder-Betrieb (schwarze Volllinie) ergibt sich ein maximales Drehmoment von 400 Nm bei rund 3000 U/min – hingegen im 4-Zylinder-Betrieb

<sup>66</sup> Vgl. Van Basshuysen, R., Schäfer, F. (Hrsg.): Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Perspektiven, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 213

<sup>67</sup> Bildquelle: Golloch, R.: Downsizing bei Verbrennungsmotoren: Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung, Berlin: Springer, 2005, S. 80



knapp unter der Hälfte mit 180 Nm. Die fehlenden 20 Nm sind darauf zurückzuführen, dass die betriebenen vier Zylinder die deaktivierten restlichen vier Zylinder mit ihren Reibverlusten antreiben müssen. Wenn man nun die schwarz strichlierte Fahrwiderstandslinie verfolgt, erkennt man, dass bis zu einer Drehzahl von knapp 3500 U/min sowie einem Drehmoment von rund 175 Nm der Vierzylinderbetrieb ausreicht. Erst sobald das notwendige Drehmoment diesen Wert überschreitet sind die restlichen vier deaktivierten Zylinder notwendig um die möglichen Betriebspunkte entlang der Lastlinie zu ermöglichen. Dies bestätigt somit, dass im Teillastbereich nicht die volle Zylinderanzahl aktive genutzt werden muss.

Im Schaubild unten links erkennt man den Zusammenhang zwischen dem effektiven Mitteldruck sowie der Drehzahl. Hierbei ist ebenso, im Vergleich mit dem vorherigen oberen Schaubild, ersichtlich, dass der Mitteldruck- sowie Drehmomentverlauf fast ident sind. Das Schaubild links zeigt, dass zur Überwindung des Fahrwiderstandes nur ein geringer Mitteldruck (ebenso Drehmoment) im gesamten aktiven Hubvolumen notwendig ist. Das ist darauf zurückzuführen, dass alle Zylinder in Betrieb sind, und sich somit ein höheres geliefertes Drehmoment einstellt.

Im unteren rechten Diagramm werden die Mitteldrücke nur in Bezug auf das aktive Hubvolumen gesetzt. Dies bedeutet, dass wenn nur mehr die Hälfte der Zylinder aktive ist, diese ein höheres Drehmoment (im Vergleich zu vorher) liefern müssen um den konstanten Fahrwiderstand zu überwinden. Das höhere notwendige Drehmoment ergibt sich aus höheren Mitteldrücken in den aktiven Zylindern, welche z.B. durch Aufladung mittels ATL einfach erreicht werden können. Schlussendlich leiten sich aus den höheren Mitteldrücken höhere Wirkungsgrade mit geringeren Kraftstoffverbräuchen sowie Schadstoffemissionen ab – siehe auch Downsizing.

### **2.2.6.2 Vorteile und Nachteile der Zylinderabschaltung**

Durch die oben beschriebenen Maßnahmen und der Stilllegung der Hälfte der Zylinder können Verbrauchseinsparungen (bis zu 10%)<sup>68</sup> erreicht werden. Ist bereits ein variabler Ventiltrieb vorhanden, so macht es also durchaus Sinn auch direkt die Zylinderabschaltfunktion zu integrieren.

Nachteilig ist die, durch die Integration des variablen Ventiltriebes, gesteigerte Komplexität des Zylinderkopfes sowie der damit verbundene Aufwand der Entwicklung und Umsetzung. Ebenfalls, aus subjektiver Sicht, negativ zu bemerken ist der sich ändernde Motorklang, welcher u.U. von manchen Kunden nicht akzeptiert wird. Bei V12 Motoren ist das Problem noch geringer, da die Umschaltung auf den 6-Zylinder Reihenbetrieb sich akus-

---

<sup>68</sup> Vgl. Van Basshuysen, R., Schäfer, F. (Hrsg.): Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Perspektiven, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 213

tisch nicht stark bemerkbar macht. Allerdings ist besonders bei 8-Zylinder Aggregaten ein hörbarer Unterschied zu verzeichnen, wenn diese in den 4-Zylinder Betrieb umschalten. Dieses Problem wird seitens der Hersteller oftmals dadurch gelöst, dass die Passagiere durch Lautsprecher im Fahrzeuginneren mit dem Motorklang beschallt werden, welcher dem Vollbetrieb aller Zylinder entspricht. Solche Maßnahmen kommen, im Zeitalter des Downsizings, immer mehr in Mode. Weiters, um den oftmals leiseren und unsportlicheren Motorklang der kleineren Aggregate zu kaschieren, werden teilweise Lautsprecher in die Abgasanlage integriert welche den Sound größerer Aggregate imitieren – siehe beispielsweise Audi SQ5 – bzw. erfolgt, wie bereits erwähnt eine Beschallung der Fahrzeuginsassen durch die bordeigene Stereoanlage. Ob dies nun wirklich von Nöten ist sei dahingestellt – es zeigt allerdings auch, dass die Akzeptanz für kleinere Motoren seitens gehobener Käuferschichten noch nicht voll ausgeprägt ist.

### 2.2.7 Wirtschaftliche Aspekte der Motorentechnik

Aus Sicht der Automobilhersteller sind, aufgrund der immer strenger werdenden Abgas- als auch Verbrauchsvorschriften, die Entwicklungs- als auch Implementierungsschritte hin zu Downsizing, der Turboaufladung, Direkteinspritzungssystemen als auch verstellbaren Ventiltrieben sowie Zylinderabschaltungen unumgänglich. Da sie die ausschlaggebenden Effizienztreiber - ohne die Anwendung von Hybridtechnologien - sind, werden diese Technologien auch bereits im Großteil der neu entwickelten PKWs verbaut. Allerdings bringen diese modernen Technologien wirtschaftliche Auswirkungen für die Hersteller als auch Endkunden mit sich.

Durch die genannten Effizienzsteigerungsmöglichkeiten steigen die Komplexität, Empfindlichkeit sowie der Entwicklungs- als auch Produktionsaufwand der Aggregate an. Aus Herstellerperspektive ist das Downsizing, zur Reduktion des Hubraumes – mit daraus folgenden meist kompakteren Motoren – besonders interessant, da es nicht nur den Materialaufwand und somit die direkten Materialkosten, sondern auch das Gewicht des Fahrzeuges reduziert. Dies wirkt sich wiederum positiv auf den Kraftstoffverbrauch als auch die Schadstoffemissionen des PKW aus. Des Weiteren werden im gleichen Zug weniger Komponenten wie z.B. Zylinder, Ventile, sowie Anbauteile benötigt um das kleinere Aggregat zu betreiben. Die Aufladung unterstützt diesen Effekt noch mehr, allerdings sind hierzu weitere, teils hochempfindliche, Bauteile (ATL, Ladeluftkühlung, Verrohrung) unvermeidlich, welche die Komplexität des Antriebsstranges zusätzlich erhöhen. Downsizing, als auch Aufladungen mittels ATL, steigern die mechanischen als auch thermischen Belastungen des Motors, weshalb eine Auswahl anforderungsgerechter, und u.U. teurerer, Werkstoffe unabdingbar wird. Vorteilhaft für Hersteller sind die verschiedenen Leistungsvarianten welche aufgrund angepasster Abstimmungswerte der Turboaufladung erreicht werden können. So ist es möglich – und durchaus auch üblich - aus einem Grundmotor unterschiedliche Leistungsstufen und Modellreihen abzuleiten. Gut ersichtlich ist dies z.B. bei BMW und deren 6-Zylinder Reihenmotor. Ausgehend vom selben Grundmotor sind bzw. waren verschiedenen Leistungsvarianten und Aufladungsformen als 25d,

30d, 35d, 40d und 50d – mit Leistungsbreiten von knapp 200 PS bis 400 PS – im Angebot. Dies bietet immense Einsparungspotenziale bei Entwicklungs- als auch Erprobungskosten im Vergleich zur Entwicklung einzelner verschiedener Motoren. Direkteinspritzungssysteme als auch Nockenwellenverstellungen machen sich bei den Herstellungskosten, aufgrund der komplizierteren Bauweise, bemerkbar – ebenso inkludiert dies die dazugehörige Steuerungstechnik und Elektronik die gebraucht wird, um die obenstehenden Systeme effektiv betreiben zu können.

Aus Kundensicht ist allen voran die möglichen Verbrauchseinsparungen von Interesse – selbstverständlich werden selbige durch äußere Einflüsse, als auch das Fahrverhalten, stark beeinflusst. Grundsätzlich lassen sich die bereits erwähnte höhere Belastung, Empfindlichkeit als auch Komplexität vermerken welche u.U. zu verringerten Laufleistungen sowie Langlebigkeit der Aggregate oder verbauten Komponenten, sowie erhöhten Wartungsaufwand sowie -kosten, führen können. Das, z.B. durch gesteigertes Drehmoment vermittelte, bessere Fahrgefühl des Motors sorgt für mehr Fahrspaß beim Kunden was weiterführend zu Kundenzufriedenheit, Wiederholkäufen oder einer Markenloyalität führen kann.

## 2.3 Hybride Antriebskonzepte

Die bisherigen Entwicklungen zur Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren – die weiter vorne vorgestellten Möglichkeiten werden zusätzlich durch sensible Steuerungselektronik verwaltet sowie die Betriebsstrategien der Nebenaggregate wie z.B. Klimakompressoren oder Lichtmaschinen optimiert – stoßen trotzdem schlussendlich an ihre Effizienzgrenzen. Um auch weiterhin die strengen Schadstoffvorgaben einhalten zu können ist es unumgänglich sich mit alternativen Antriebskonzepten zu beschäftigen. Selbige Vorgaben beziehen sich auf den Flottenverbrauch eines Herstellers d.h. welche Schadstoffe stoßen die Fahrzeuge des Herstellers im Schnitt aus. Das ambitionierte Ziel der EU, dass im Schnitt alle ab 2020 neu zugelassenen PKW nur mehr 95 g CO<sub>2</sub>/km ausstoßen dürfen, verlangt den Herstellern alles ab. Um auch in Zukunft z.B. Sportwagen anbieten zu können müssen im Gegenzug emissionsarme Fahrzeuge in großen Mengen abgesetzt werden. Dies zwingt die Industrie zum Umdenken und zu Entwicklungsschritten hin zu Hybridtechnologien. Gut erkennbar ist dieser Schritt bei Porsche, wo seit geraumer Zeit auch Saugmotor-Ikonen wie der Porsche 911 auch in den Basisausführungen auf Turbomotoren umgerüstet werden um die Schadstoffemissionswerte zu verringern. Ebenso werden Hybridvarianten vom Panamera sowie Cayenne angeboten. All dies geschieht mit dem eindeutigen Ziel die Flottenemissionswerte in den Griff zu bekommen.

Auch die stetig steigenden Ölpreise (siehe Abb. 25) zwingen schlussendlich zum Umdenken: die erzielten technologischen Verbrauchseinsparungen werden durch steigende Treibstoffpreise zunichte gemacht – was preissensitive Kundenschichten schlussendlich zur Abkehr von fossilen Brennstoffen treibt. Im Moment geschieht dies durch die Integration hybrider Antriebskonzepte, welche die Effizienz des Fahrzeuges noch weiter steigern

sollen – mit dem eindeutigen Ziel der Verbrauchs- als auch Schadstoffminimierung. Die geschichtliche Entwicklung, die verschiedenen Betriebsweisen sowie Einsatzmöglichkeiten sollen nachfolgend beschrieben werden.

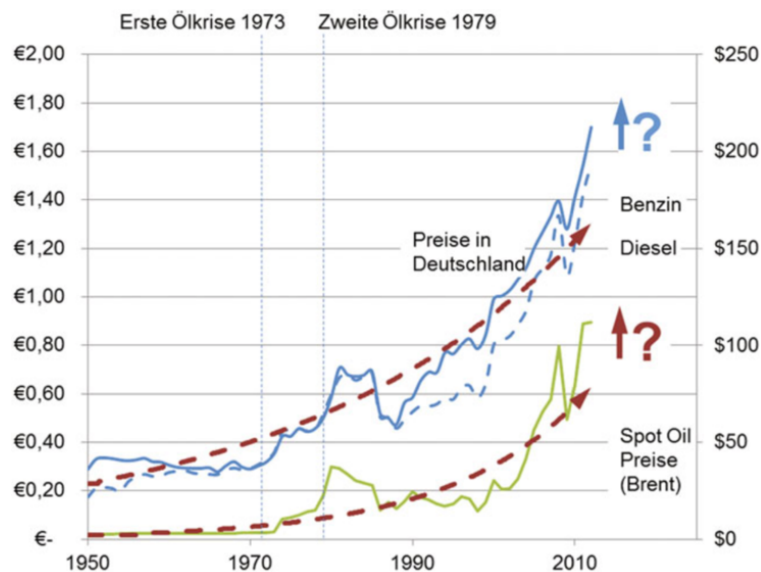


Abbildung 25: Entwicklung der Rohöl- sowie Treibstoffpreise seit 1950<sup>69</sup>

### 2.3.1 Geschichtliche Entwicklung und Definition

Die Bezeichnung Hybrid hat seinen Ursprung in dem lateinischen Begriff „hybrida“, was so viel wie Mischling bedeutet.<sup>70</sup> Grundsätzlich lassen sich unter hybriden Antriebskonzepten all jene Antriebsarten zusammenfassen, welche durch mehrere Energiequellen angetrieben werden. Dies kann z.B. durch Verbrennungsmotoren mit Elektromotoren, Gasturbinen oder Dampfmaschinen geschehen. Heute werden allerdings üblicherweise die Kombinationen aus modernen Verbrennungsmotoren und Elektromotoren angestrebt. Man möchte meinen, dass diese Idee relativ jung sei – allerdings geht dieses Prinzip bereits auf die Anfänge des Automobils zurück:

Bereits 1902 baute Ferdinand Porsche mit dem Wiener Fahrzeugbauer Lohner ein Hybridfahrzeug welches einen Verbrennungsmotor mit elektrischen Radnabenmotoren kombinierte. Das „Mixte“ genannte Fahrzeug konnte durch Komfort und Schnelligkeit punkten – damalige Verbrennungsmotoren waren, aufgrund des notwendigen Kurbelstarts, mitunter nicht ungefährlich, die Leistungsentfaltung war den Elektromotoren weit unterlegen

<sup>69</sup> Bildquelle: Schramm, D., Koppers, M.: Das Automobil im Jahr 2025: Vielfalt der Antriebstechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 7

<sup>70</sup> Vgl. Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K. (Hrsg.): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012, S. 1

und die unausgereiften Anfahrkupplungen erschwerten das Losfahren zudem noch weiter. Die schweren Batterien des Elektromotors wurden umgekehrt durch die Zusatzleistung des Verbrennungsmotors kompensiert. So schafften die beiden Erfinder den Spagat zwischen batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Fahrzeugen der damaligen Zeit. Die weiteren Entwicklungen hin zu leistungsstärkeren Verbrennungsmotoren, komfortablen Anfahrkupplungen als auch elektrischen Startern (1920) beendeten allerdings rasch die Bestrebungen nach hybriden Fahrzeugkonzepten – erst ab 1965 erweckten die steigenden Ölpreise wieder das Interesse an selbigen. Den Durchbruch in der Massenproduktion schaffte Toyota mit dem 1997 eingeführten Prius, welches sich seit Markteinführung bis 2011 rund 2,3 Mio. Mal verkaufte.<sup>71</sup>

### 2.3.2 Konzepte und Betriebsweisen

Wie bereits erwähnt, liegt der Fokus der Hersteller heute auf Hybridantrieben mit der Kombination aus Verbrennungsmotoren und Elektromotoren. Selbstverständlich gibt es hierbei verschiedenste Anordnungsmöglichkeiten der Antriebselemente entlang des Antriebsstranges, wobei grundsätzlich in serielle, parallele sowie leistungsverzweigte Hybridantriebe unterteilt werden kann. Wie die drei Varianten aufgebaut sind sowie funktionieren soll im Folgeabschnitt geklärt werden. Vorab veranschaulicht die nachstehende Tabelle die Erfüllung verschiedener konstruktiver als auch effizienzsteigernder Eigenschaften der unterschiedlichen Hybridsysteme.

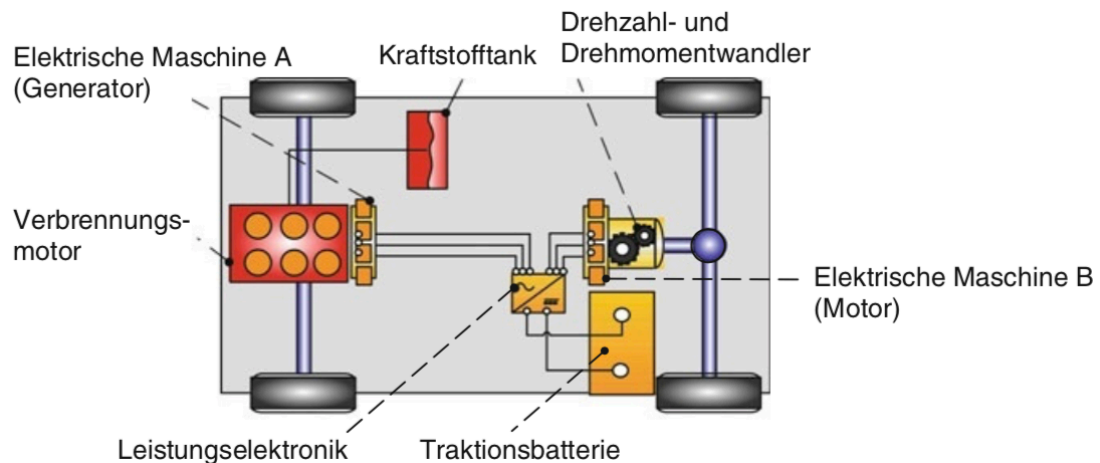
**Tabelle 2: Eigenschaften der Hybridsysteme<sup>72</sup>**

	Mildhybrid	Vollhybrid		
		Paralleler Hybrid	Serieller Hybrid	Leistungsverzweigter Hybrid
Start-Stopp-Funktion	✓	✓	✓	✓
Rekuperation	✓	✓	✓	✓
Boosten	✓	✓	✓	✓
Rein elektrisches Fahren	✗	✓	✓	✓
Mechanische Verbindung des V-Motors zu den Antriebsrädern	✓	✓	✗	✓
Plug-in-Anschluss möglich	✗	✓	✓	✓

<sup>71</sup> Vgl. Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K. (Hrsg.): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012, S. 4ff

<sup>72</sup> Tabellenquelle: Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 8

### 2.3.2.1 Serielle Hybridantriebe



**Abbildung 26: Aufbau Serieller Hybridantrieb<sup>73</sup>**

Ein serieller Hybridantrieb (schematischer Aufbau siehe oben) besteht aus einem Verbrennungsmotor, welcher einen Generator antreibt, um mechanische in elektrische Energie umzuwandeln. Diese wird in einer Traktionsbatterie – nicht zu verwechseln mit der Bordbatterie – zwischengespeichert und liefert die nötige Energie zum Betreiben des elektrischen Motors, der über ein Getriebe den PKW antreibt. Selbstverständlich ist ebenso leistungsstarke Regelelektronik verbaut, um die optimale Effizienz, einerseits des Betriebs des Verbrennungsmotors, des Ladevorganges als auch des Betriebs der elektrischen Maschine, zu gewährleisten.

Hierbei besteht keine physikalische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und den Rädern, d.h. der Motor kann nicht zum direkten Antrieb genutzt werden, sondern hat nur die Aufgabe, den Generator zur Stromspeisung in die Batterie zu betreiben. Der Vortrieb wird durch die elektrischen Maschinen garantiert, welche von der Traktionsbatterie gespeist werden – erreicht der Ladezustand selbiger ein niedriges Niveau, so wird der Verbrennungsmotor, zum Betreiben des Generators, eingeschaltet. Dies hat den Vorteil, dass der Verbrennungsmotor nicht in verschiedenen Drehzahlbereichen operieren muss, sondern nur im effizientesten optimalen Lastpunkt. Selbstredend sollte ein möglichst verbrauchs- als auch schadstoffarmer Motor eingesetzt werden, um die Umweltbilanz des Hybridfahrzeuges nicht negativ zu beeinflussen – im rein elektrischen Betrieb ist selbiges emissionsfrei unterwegs. Die, meist als Radnabenmotor (oder radnahe Motoren) ausgeführten, Elektromotoren haben so auch die Möglichkeit zur Realisierung eines Allradantriebes, sowie zur Implementierung von Bremsenergierückgewinnungsmaßnahmen. Hierbei werden zum Verzögern des Fahrzeuges die Antriebsmotoren in den Generatorbetrieb

<sup>73</sup> Bildquelle: Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K. (Hrsg.): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012, S. 28

umgeschaltet und wandeln so wieder die Bremsenergie in elektrische Energie zum Beladen der Traktionsbatterie um. Wird eine noch stärkere Verzögerung gefordert wie z.B. bei einer Vollbremsung, schalten sich die üblichen Bremsscheiben des Fahrzeuges dazu. Nachteilig bei dieser Ausführung sind die häufigen Energiewandlungen: ausgehend vom Kraftstoff (chemische Energie) durch Verbrennung im Motor (mechanische Energie), weiter über den Generator in die Batterie (elektrische Energie) und schlussendlich zum Elektromotor (elektrische Energie in kinetische Energie). Bei jedem Wandlungsprozess entstehen so Verluste, welche den Gesamtwirkungsgrad in vielen Betriebspunkten sehr niedrig halten. Ebenso werden drei Energiewandler benötigt (Verbrennungsmotor, Generator, Elektromotor) welche alle in ähnlichen Leistungsgrößen ausgeführt werden sollten. Des Weiteren entsteht durch die zusätzlichen schweren Bauteile wie Generator, Batterie und Elektromotor ein beachtliches Zusatzgewicht welches den Verbrauch wiederum steigert.<sup>74</sup>

Üblicherweise werden die Komponenten Verbrennungsmotor, Generator und Elektromotor in ähnlich großen Leistungen gehalten, was bedeutet, dass das Fahrzeug ohne Einschränkungen dauerhaft mit seiner Höchstgeschwindigkeit betrieben werden kann, da der Verbrennungsmotor die notwendige Leistung stets bereitstellen kann. Limitierend für die Reichweite im rein elektrischen Betrieb ist hier die Batteriekapazität. Eine andere Herangehensweise verfolgt das Range Extender Prinzip wie z.B. im BMW i3 mit Range Extender, bei dem der Verbrennungsmotor als auch der Generator mit geringeren Leistungen als der Elektromotor ausgestattet sind. Somit ist der Verbrennungsmotor nur als Hilfsantrieb zu verstehen, der den Vortrieb, mit verringerter Leistung, auch bei Entladung der Batterie gewährleistet. Limitierend ist hierbei das Kraftstofftankvolumen, wobei selbiges für eine Reichweite von rund 600 km ausgelegt ist.<sup>75</sup>

Die beiden Prinzipien klingen sehr verlockend, sind allerdings in einem Punkt kritisch zu hinterfragen: den Fahrleistungen. Generell ist zu beachten, dass wenn man hohe Fahrleistungen erreichen will, man unweigerlich auch hohe Antriebsleistungen (siehe auch Kapitel 2.1.2.1) braucht. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit zu größeren Verbrennungsmotoren, Generatoren sowie Elektromotoren. Ersteres Prinzip geht genau in diesem Punkt nicht mehr auf: Will man beispielsweise, allgemein formuliert, in einem normalen (nur Verbrennungsmotor) PKW X km/h schnell fahren, so ist abhängig vom Fahrzeuggewicht ein Verbrennungsmotor mit A kW an Leistung erforderlich. Münzt man selbiges Prinzip auf ein Hybridfahrzeug um, bedeutet dies, dass wenn man nun die gleichen X km/h schnell fahren möchte, eine zusätzliche Verbrennungsmotorleistung A+B kW notwendig ist. Doch warum ist das so? Im Vergleich zum nicht-hybrid PKW benötigt das Hyb-

---

<sup>74</sup> Vgl. Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K. (Hrsg.): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012, S. 29

<sup>75</sup> Vgl. Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K. (Hrsg.): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012, S. 29f

ridfahrzeug zusätzliche schwere Bauteile wie den Generator, die Batterie sowie die Elektromotoren – dies bedingt ein höheres Fahrzeuggewicht und somit eine höhere notwendige Motorleistung um auf die selben Endgeschwindigkeiten zu kommen. Ist es für Schnelfahrer somit sinnvoller auf die dazukommenden Bauteile und Wandlungsverluste zu verzichten und ein nicht-hybrid Fahrzeug einzusetzen? Man kann sich aber auch fragen ob man überhaupt schnell fahren muss – ist es überhaupt das Ziel der Hybridtechnologie schnell zu fahren?

Genau hier setzt das Range Extender Prinzip ein: Der Elektromotor kann hier, im Vergleich zum Verbrennungsmotor und Generator, groß ausgeführt werden um die erwarteten Fahrleistungen für den alltäglichen Verkehr zu erfüllen. So kann man bei Bedarf schnell unterwegs sein, allerdings nur solange der Batterieladestand es erlaubt – kann die Batterie die Leistung nicht mehr liefern, schaltet sich die Generatoreinheit hinzu, so ist eine Weiterfahrt, wenn auch mit verringerter Leistung, gewährleistet.

### 2.3.2.2 Parallele Hybridantrieb

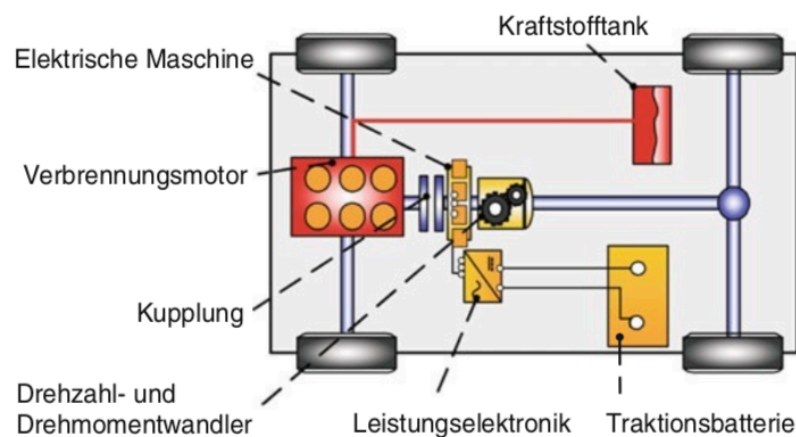


Abbildung 27: Aufbau Paralleler Hybridantrieb<sup>76</sup>

Wie in der obenstehenden Abbildung ersichtlich, besteht bei parallelen Hybridantrieben, im Gegensatz zu seriellen eine direkte Verbindung zwischen dem Verbrennungsmotor und den Antriebsrädern. Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass kein Generator vorhanden ist – der Elektromotor wird alleinig von der Traktionsbatterie gespeist – und, dass der Verbrennungs- und Elektromotor entlang des Antriebsstranges miteinander verbunden sind. Da der Elektromotor im Antriebsstrang selbst, und nicht wie bei seriellen Hybridantrieben bei den Rädern, positioniert ist, ist bei Parallelhybriden meist nur ein Elektromotor im Einsatz, welcher relativ einfach in das vorhandene Antriebskonzept integriert werden kann. Wichtig bei dieser Bauart ist, dass beide Motoren parallel den Antrieb

<sup>76</sup> Bildquelle: Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K. (Hrsg.): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012, S. 31



durchführen können – was bedeutet, dass entweder ohne elektrische Unterstützung, nur elektrisch oder in Kombination mit beiden Motoren, gefahren werden kann. Dies ermöglicht ebenso das Rekuperieren von Bremsenergie, Start-Stopp Lösungen, rein elektrisches Fahren, das Boosten und auch Lastpunktverschiebungen. Bei Parallelhybriden werden vier Grundausrüstungen, je nach Position des Elektroantriebes entlang des Antriebsstranges, unterschieden. Die verschiedenen Arten, ihre Beschreibung sowie ihr Vermögen des rein elektrischen Fahrens sowie des regenerativen Bremsens werden in der nachstehenden Tabelle angeführt:<sup>77</sup>

**Tabelle 3: Varianten von Parallelhybriden<sup>78</sup>**

Bezeichnung	Weitere Bezeichnung	Beschreibung	Elektrische Fahrt	Regeneratives Bremsen
Start-Stopp-System	3S	Verstärkter Starter, geeignet für häufigen Start-Stopp-Betrieb	Nein	Nein
P1	BSG, RSG, ISG, Mikro-Hybrid, Mild-Hybrid	Elektrische Maschine am Verbrennungsmotor	Nein	Gering
P2	P2-HEV	Elektrische Maschine zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe	Ja	Gut
P3	TS-HEV	Elektrische Maschine am oder hinter dem Getriebe	Ja	Gut
P4	AS-HEV	Elektrische Maschine an der zweiten Achse	Ja	Sehr gut

Bei **P1 Hybriden** befindet sich der Elektromotor direkt am Kurbelwellenausgang, was das einfache Realisieren von Start-Stopp Funktionen, das Boosten oder die Lastpunktverschiebung ermöglicht. Die elektrische Leistung beträgt maximal 20 kW und ist somit nicht für einen rein elektrischen Betrieb ausgelegt bzw. geeignet. Als Beispiel für diese Klasse wäre die Mercedes S-Klasse als S400 Hybrid zu nennen.

**P2 Hybride** hingegen ermöglichen den rein elektrischen Vortrieb, da der Elektromotor hinter dem Verbrennungsmotor (meist zwischen Kupplung und Getriebe) angebracht ist. Auch diese Variante ermöglicht Start-Stopp Funktionen, Lastpunktverschiebungen und das Boosten – hinzu kommt die Eignung für die Bremsenergieerückgewinnung beim Schubbetrieb. Dabei wird der Verbrennungsmotor ausgekuppelt und der Elektromotor geht in den Generatorbetrieb, ladet somit die Traktionsbatterie und sorgt für eine Verzögerung.

<sup>77</sup> Vgl. Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K. (Hrsg.): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012, S. 31ff

<sup>78</sup> Tabellenquelle: Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K. (Hrsg.): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012, S. 33

rung des Fahrzeuges. Da der PKW auch rein elektrisch betrieben werden kann – die Leistungen betragen hier meist zwischen 20 kW und 50 kW – ergeben sich hohe Verbrauchseinsparungspotenziale. Die elektrische Maximalreichweite wird durch die Batteriekapazität, die elektrische Maximalgeschwindigkeit durch die Motorleistung, bestimmt.

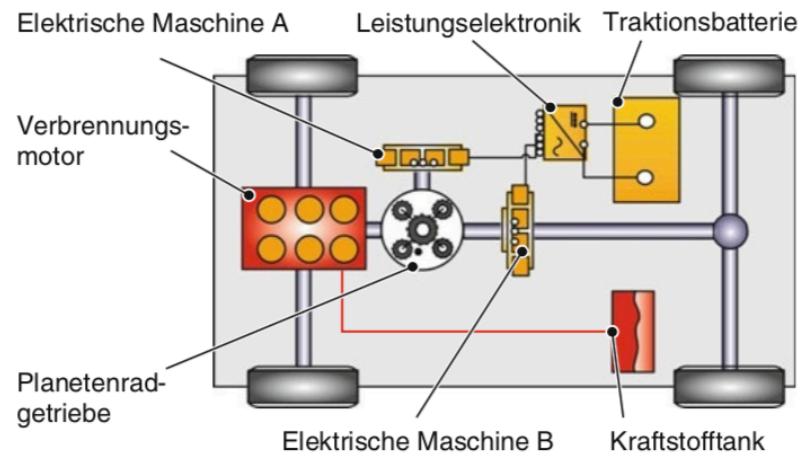
Selbiges gilt auch für **P3 Hybridfahrzeuge**, welche sich zum P2 nur dahingehend unterscheiden, dass der Elektromotor am bzw. hinter dem Getriebe installiert ist, weder eine Start-Stopp Funktion, noch eine Lastpunktverschiebung, möglich ist. Dadurch, dass der Elektromotor direkt am Getriebe sitzt lassen sich Schaltunterbrechungen sehr einfach ausgleichen, was den Fahrkomfort als auch den Vortrieb positiv beeinflusst.

**P4 Hybridfahrzeuge** teilen die Antriebsleistungen für die einzelnen Achsen auf. So kann entweder die Vorderachse vom Verbrennungsmotor, die Hinterachse vom Elektromotor, oder umgekehrt angetrieben werden – das Resultat ist ein vollvariabler Allradantrieb, welcher einzelne Achsantriebe zu- oder wegschalten kann. Dieses Prinzip ermöglicht so das einfache Rekuperieren von Bremsenergie – hierzu macht es Sinn den Elektroantrieb an der Vorderachse anzubringen, da dort höhere Bremsmomente wirken – sowie das Boosten. Allerdings sind Lastpunktverschiebungen, als auch Start-Stopp Funktionen, da der Elektromotor nicht direkt mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt ist, nicht möglich. Dieses Prinzip findet mittlerweile auch bei Sportwagen seine Anwendung, so ist beispielsweise der Porsche 918 oder BMW i8 mit einer elektrisch betriebenen Vorderachse ausgestattet um so sehr einfach einen Allradantrieb zu simulieren. Abschließend soll noch vermerkt sein, dass bei Parallelhybriden auch eine Kombination der verschiedenen Varianten P1 bis P4 möglich ist – hierbei wird dann allerdings noch eine zweite elektrische Maschine, welche in den Antriebsstrang eingebaut wird, benötigt.<sup>79</sup>

---

<sup>79</sup> Vgl. Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K. (Hrsg.): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012, S. 33ff

### 2.3.2.3 Leistungsverzweigte Hybridantriebe



**Abbildung 28: Aufbau Leistungsverzweigter Hybridantrieb<sup>80</sup>**

Leistungsverzweigte Hybridkonzepte sind als Kombination der beiden vorhergehenden Typen zu verstehen – schematische Darstellung siehe oben. Hierbei wird hinter dem Verbrennungsmotor ein Planetengetriebe integriert, welches einerseits eine elektrische Maschine (A) zur Stromerzeugung, sowie die Antriebsachse antreiben kann – die Antriebsleistung wird also in einen elektrischen, und einen mechanischen Teil aufgeteilt. Daraus folgend kann das Fahrzeug sowohl als serieller Hybrid (Betrieb eines Generators durch den Verbrennungsmotor; Antrieb durch Elektromotor), als auch paralleler Hybrid (Antrieb durch Verbrennungsmotor und Elektromotor) ausgeführt werden. Vorteilhaft ist hierbei, dass beim Betrieb des Verbrennungsmotors, auch wenn dieser zum Antrieb genutzt wird, immer ein Teil der gelieferten mechanischen Energie durch den Generator in elektrische Energie umgewandelt wird und somit die Traktionsbatterie lädt. Bei dieser Ausführung ist ein vollständig variables, je nach Leistungsanfordernissen, Ein- sowie Ausschalten aber auch Kombinieren der Antriebe möglich, des Weiteren auch Start-Stopp Systeme, Rekuperieren sowie Boosten.<sup>81</sup>

### 2.3.3 Einsatzstrategien und Funktionsprinzipien

Die eingebauten Hybridsysteme können in verschiedensten Ausprägungen und Strategien eingesetzt werden – von kleinsten elektrischen Leistungen zur Realisierung von Start-Stopp Automaten bis hin zu größeren Elektromotoren, die das rein elektrische Fahren

<sup>80</sup> Bilquelle: Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K. (Hrsg.): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012, S. 43

<sup>81</sup> Vgl. Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 7f

ermöglichen. Welche verschiedenen Ausprägungsstufen es dabei gibt ist in der nachstehenden Abbildung ersichtlich - wie diese funktionieren wird in den folgenden Unterpunkten zusammengefasst.

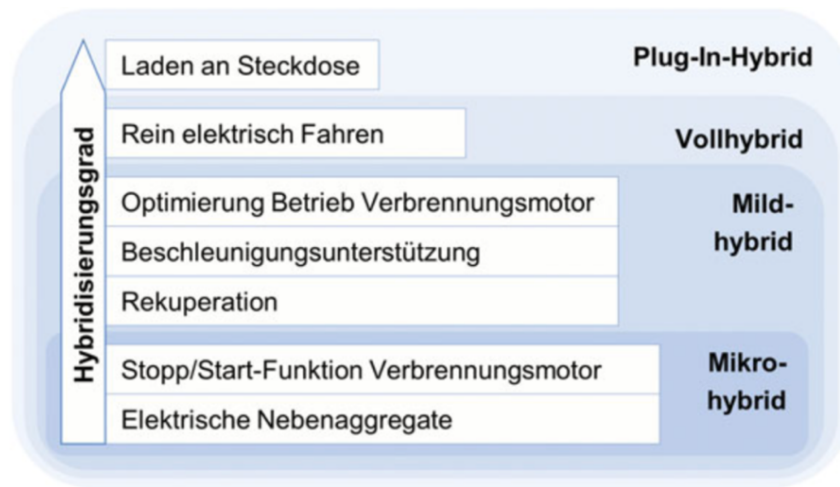


Abbildung 29: Hybridisierungsgrade<sup>82</sup>

### 2.3.3.1 Start-Stop Automatik

Die Start-Stop Automatik ist dafür verantwortlich, dass der Verbrennungsmotor so schnell wie möglich im Stillstand des PKWs abgeschaltet wird. Die Grundidee dahinter ist, dass ein Motor der nicht läuft auch keinen Treibstoff verbraucht und somit auch keine Schadstoffe erzeugt. Sobald wieder losgefahren werden soll, wird der Motor entweder durch den Starter selbst, oder durch den integrierten Elektromotor gestartet. Bei Automatikfahrzeugen passiert dies normalerweise so, dass bei Stillstand und Betätigung der Bremse der Motor stillgelegt wird, sobald die Bremse losgelassen und das Gaspedal berührt wird, startet der Motor. Bei Fahrzeugen mit Schaltgetrieben wird im Stillstand der Motor abgestellt, sobald der Gang ausgelegt wird. Zum Anfahren wird zuerst die Kupplung getreten, dabei startet der Motor, der Gang eingelegt und die Fahrt fortgeführt. Die Systeme berücksichtigen hierbei auch äußere Bedingungen wie das Wetter. Ist es beispielsweise sehr kalt, so kann es sein, dass der Motor nicht abgestellt wird um schneller die Betriebstemperatur der Aggregate erreichen zu können – selbiges gilt für die Klimatisierung bei sehr heißem Wetter. Die Steuerungselektronik entscheidet dann eigenständig, ob es sinnvoll ist den Motor abzustellen und die Klimatisierung elektrisch weiterzuführen, oder den Motor laufen zu lassen um den Klimakompressor weiter anzutreiben. Fahrzeuge mit Start-Stop Automaten können bereits als Mikro-Hybride bezeichnet werden.

<sup>82</sup> Bildquelle: Schramm, D., Koppers, M.: Das Automobil im Jahr 2025: Vielfalt der Antriebstechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 22

### **2.3.3.2 Boosten**

Unter Boosten versteht man das elektrische Unterstützen des Verbrennungsmotors in verschiedenen Fahrsituationen. Dies kann beispielsweise in der Beschleunigungsphase, bei Schaltvorgängen oder im unteren Drehzahlbereich – in Situationen in denen noch nicht ausreichend viel Drehmoment seitens des Verbrennungsmotors bereitgestellt wird – erfolgen. Hierbei arbeiten der elektrische Antrieb und der Verbrennungsmotor zusammen und ergeben so die maximale Systemleistung des Fahrzeuges. Auch die Lastpunktverschiebung kann u.U. zum Boosten gezählt werden. Hierbei wird der Verbrennungsmotor soweit elektrisch unterstützt, dass dieser in einem effizienteren Lastpunkt arbeiten kann und somit der Kraftstoffverbrauch als auch der Schadstoffausstoß reduziert wird.

### **2.3.3.3 Mild-Hybrid**

Unter Mild-Hybrid Fahrzeugen werden all jene Fahrzeuge zusammengefasst, die einen elektrischen Antrieb zur Unterstützung des Verbrennungsmotors einsetzen – dieser Antrieb fällt i.d.R. bis 20 kW (siehe auch Kapitel 2.3.2.2 P1 Hybride) aus. Als Unterstützung wird in diesem Fall das Boosten sowie Lastpunktverschiebungen verstanden – ebenso ist es hier möglich Bremsenergie zum Laden der Traktionsbatterie zu rekuperieren. Die Einschränkung von Mild-Hybriden ist, dass sie keine rein elektrische Fahrt bieten können – hierzu ist ein Voll-Hybrid System notwendig. Allerdings steigern sie durch ihre elektrische Unterstützung das Downsizingpotenzial von PKW – für vergleichbare Fahrleistungen können daraus folgend kleinere, effizientere Verbrennungsmotoren verbaut werden.

### **2.3.3.4 Voll-Hybrid**

Im allgemeinen Volksmund ist, wenn von Hybridfahrzeugen gesprochen wird, von Voll-Hybridfahrzeugen die Rede. Darunter werden all jene PKW verstanden, welche sich auch rein elektrisch fortbewegen können. Ob dies in Richtung Elektrofahrzeug ausgerichtet ist (serielle Hybride) oder eher als stark elektrisch unterstütztes Fahrzeug (parallele Hybride) spielt hierbei keine Rolle. Sie vereinen alle Eigenschaften der vorher genannten Kategorien in einem Fahrzeug und bieten somit auch das höchste Einsparungspotenzial in Sachen Kraftstoffverbrauch sowie Schadstoffemission.

### **2.3.3.5 Plug-in Hybrid**

Unter Plug-in Hybriden versteht man alle Hybridfahrzeuge deren Batterie durch Ladeeinrichtungen an Steckdosen geladen werden können. Dies ermöglicht das Laden der Traktionsbatterie unabhängig davon, ob der Verbrennungsmotor betrieben wird oder nicht. So kann beispielsweise das Fahrzeug über Nacht an der Steckdose geladen werden um dann tagsüber auch vollelektrisch (bei Voll-Hybriden) – je nach Fahrbedingungen und Streckenlänge – unterwegs zu sein. Das Laden ist, im Vergleich zu rein elektrischen Fahrzeugen, selbstverständlich nicht unbedingt notwendig um den PKW zu betreiben. Serielle wie auch parallele Hybride sind nicht auf den Strom angewiesen, bei Bedarf kann

dieser selbst durch den Verbrennungsmotor erzeugt werden (bei seriellen Hybriden nach dem Range Extender Prinzip bedeutet dies allerdings eingeschränkte Fahrleistungen).

### 2.3.4 Vorteile und Probleme von Hybridantrieben

Hybridsysteme wurden entworfen um den Kraftstoffverbrauch sowie den Schadstoffausstoß zu senken. Doch wie groß sind die tatsächlichen Effekte?

Bei Mikro-Hybrid Fahrzeugen, also jenen mit Start-Stopp Einrichtungen und u.U. elektrischer Unterstützung von Nebenaggregaten, weisen ein Potenzial zur Kraftstoffverbrauchsenkung von 3% bis 6% auf. Hingegen können Mild-Hybrid Varianten mit höheren elektrischen Leistungen bis 20 kW durch unterstützendes Eingreifen in den Antriebsstrang bereits Einsparungspotenziale von 10% bis 20% für sich beanspruchen. Voll-Hybrid Fahrzeuge weisen mit 30% bis 40% das höchste Einsparungspotenzial auf. Dies ist vor allem auf die Möglichkeit des rein elektrischen Betriebes zurückzuführen.<sup>83</sup> Allerdings muss man hierbei selbstverständlich auch die verschiedenen Fahrsituationen berücksichtigen. Im globalen Schnitt, als auch in Labor Testzyklen, mögen diese Werte durchaus stimmen, doch im realen Alltagsgebrauch kommt es auf die täglichen Fahrstrecken an. Wird viel Stadt gefahren, so macht ein Hybridfahrzeug durchaus Sinn. Die Start-Stopp Automatik kann seine Funktion einsetzen, es kann elektrisch unterstützt werden, oder sogar ganz elektrisch gefahren werden. Doch wird hingegen viel Autobahn oder zügig auf der Landstraße, womöglich auch noch bergauf, gefahren, so kann der Hybrid seine Vorteile nur noch bedingt ausspielen. Das höhere Fahrzeuggewicht (Zusatzgewicht aufgrund Hybridtechnik zwischen 10% bis 12%)<sup>84</sup> wird bei Bergauffahrten ohne elektrische Unterstützung den Verbrauch sogar steigen lassen. Was die Verbrauchseinsparungen angeht, sind also immer der persönliche Fahrbedarf und Streckensituation zu prüfen.

Neben dem Vorteil des im Schnitt geringeren Verbrauches lassen sich auch subjektive Vorteile wie gesteigertes Drehmoment bei Anfahrtsituationen oder Überholmanövern feststellen – somit kann Hybridtechnologie auch zum Fahrspaß beitragen (auch deshalb werden immer öfter Hybridtechnologien im Sportwagenbau eingesetzt). Auch das geräuscharme Fahren im elektrischen Betrieb, sowie das Wissen emissionsfrei unterwegs zu sein, können als Vorteil gewertet werden.<sup>85</sup>

---

<sup>83</sup> Vgl. Stan, C.: Alternative Antriebe für Automobile: Hybridsysteme – Brennstoffzellen – alternative Energieträger, 4. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2015, S. 365f

<sup>84</sup> Vgl. Stan, C.: Alternative Antriebe für Automobile: Hybridsysteme – Brennstoffzellen – alternative Energieträger, 4. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2015, S. 394

<sup>85</sup> Vgl. Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K. (Hrsg.): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012, S. 26f

Ebenso darf nicht vergessen werden, dass durch die verstärkte Fokussierung der Automobilindustrie, mit der einhergehenden publiquen Wirksamkeit, auf das Thema der Hybridtechnik und Schadstoffreduzierung auch das öffentlich Interesse aber vor allem das Bewusstsein für die Umwelt sicher zugenommen haben. Somit trägt auch die Hybridtechnologie zur Sensibilisierung der Massen bei, und ebnet als Brückentechnologie den Weg für eine massentaugliche, langfristige Elektrifizierung des Automobils.

Als nachteilhaft sind definitiv die gesteigerte Komplexität des Antriebsstranges, als auch die höheren Anschaffungskosten von Mild- als auch Voll-Hybridfahrzeugen im Vergleich zu konventionellen PKWs zu nennen. Start-Stopp Automaten (also Mirko-Hybrid Systeme) gehören heute bei Neufahrzeugen bereits vermehrt zur Serienausstattung. Die erhöhte Komplexität durch die zusätzlichen elektrischen Bauteile – welche u.U. sogar Hochvolt-systeme beinhalten – steigern zudem die Wartungs- und Instandhaltungskosten. Auch die Langlebigkeit der Batteriesysteme, besonders unter extremen Umweltbedingungen wie Kälte oder Hitze, ist noch fragwürdig.

### **2.3.5 Wirtschaftliche Aspekte hybrider Antriebskonzepte**

Die Automobilindustrie hat, teils aufgrund strenger staatlicher Umweltvorgaben gezwungenmaßen, den Hybridsektor als zukünftiges Schwerpunktthema für sich entdeckt. Um langfristig wirtschaftlich überleben zu können müssen auch Hybridkonzepte angeboten werden, nicht nur um Strafzahlungen seitens des Staates auszuweichen, sondern auch um nicht die Gunst umweltbewusster oder preisbewusster Kundenstämme zu verlieren. Preisbewusst deshalb, da es absehbar ist, dass sich die Treibstoffpreise auf lange Sicht nicht verringern werden – deshalb macht es durchaus Sinn bei einer langfristigen Investition wie bei einem PKW eine möglichst effiziente Antriebsvariante auszuwählen. Es darf hier nicht vergessen werden, dass bei den anhaltenden Wachstumserwartungen der Automobilindustrie jedes Jahr eine Flut an Neufahrzeugen produziert wird. Deshalb ist es auch ihrerseits notwendig auf Hybridfahrzeuge zu setzen, um bei den vielen Neuansmeldungen so den Flottenbestimmungen (Verbrauchs- und Abgaswerte) in den Grenzwerten zu halten. So können es sich Großserienhersteller im Premiumsegment wie beispielsweise Mercedes Benz, Audi oder BMW auch weiterhin leisten ineffiziente Motorisierungen bei gehobenen Fahrzeugklassen anzubieten, da diese durch die Überzahl der effizienten Antriebskonzepte im Vergleich nicht mehr maßgeblich ins Gewicht fallen. Somit könnte man überspitzt formulieren, dass mitunter die Hybridtechnologie genutzt wird um die zahlungskräftige Kundenoberschicht nicht zu verlieren. Auch um den Anschluss zur Elektromobilität nicht zu verpassen, investieren die Hersteller kräftig in die Entwicklung von Hybridfahrzeugen. Die dort gewonnen Erkenntnisse in der Batterie-, Regelungs- und Antriebstechnik können so später auf den vollelektrischen Antriebssektor übertragen zu können.

Für die Kunden macht sich der gesteigerte Kaufpreis für Hybridfahrzeuge bemerkbar – spätestens sobald das Angebot an Hybridfahrzeugen so breit ist, wie jetzt bei konventionellen Fahrzeugen, wird sich früher oder später eine Akzeptanz den teureren Antriebs-

technologien gegenüber einstellen. Oder aber die neuartigen Fahrzeuge werden in so großen Massen hergestellt, dass seitens der Hersteller die Verkaufspreise gesenkt werden. Es sei hier dahingestellt ob die Industrie die durch hohe Stückzahlen entstehenden Skaleneffekte an die Kunden weiter geben wird, oder eher nutzen wird um weitere Überschüsse zu generieren.



## 3 Schluss

Nachdem die verschiedenen Themenbereiche des Karosseriebaus, der Motorentechnik sowie der Hybridtechnik beleuchtet wurden, sollen zum Abschluss der Arbeit nochmals die Ergebnisse zusammengefasst, sowie einige Prognosen für die zukünftigen Entwicklungen im Fahrzeugbau formuliert werden.

### 3.1 Ergebnisse

Die Arbeit befasste sich mit verschiedenen Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung moderner PKWs und betrachtete hierbei unter anderem den Karosseriebau, die Motorentechnik als auch hybride Antriebskonzepte. An den Enden der jeweiligen Kapitel wurden wirtschaftliche Aspekte selbiger Technologien und Möglichkeiten für Hersteller als auch Kunden diskutiert.

Aus dem Bereich des **Karosseriebaus** sind vor allem folgende Grundüberlegungen für effiziente Fahrzeuge hervorgegangen: um den Kraftstoffverbrauch sowie Schadstoffemissionen zu senken soll die Fahrzeugmasse, ebenso die zu überwindenden Widerstände, insbesondere der Luftwiderstand, so gering wie möglich gehalten werden. Näher eingegangen wurde dabei auf **verschiedene Werkstoffe im Karosseriebau** wie beispielsweise Stahl, Aluminium und verschiedenste Kunststoffe sowie Überlegungen zum Thema Leichtbau. Dabei wurden nicht nur die Gewichts- als auch Festigkeitseigenschaften der verschiedenen Materialien diskutiert, sondern auch wirtschaftliche Aspekte wie die Herstellung, Verarbeitbarkeit aber auch das Thema des Recyclings behandelt. Ebenso verdeutlicht wurde die Relation zwischen der angestrebten Gewichtseinsparung und den Gesamtkosten eines Fahrzeuges – je mehr zum Leichtbau tendiert wird, umso höher entfallen die Gesamtkosten für Material, Engineering sowie Fertigung. Was schlussendlich die möglichen Einsparungspotenziale in Bezug auf die Fahrzeugmasse betreffen, sind Ergebnisse von bis zu 0,35 l/100km pro 100 kg Fahrzeugmassenreduktion zu erwarten. Darauf folgten die **Grundlagen der Aerodynamik**, die Zusammenhänge zwischen Luftwiderstand und der zu erbringenden Leistung des Motors, sowie verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der Aerodynamik von PKWs. Letztere unterteilten sich einerseits in kostengünstige, bereits weitestgehend genutzte, Maßnahmen sowie in kostenintensive Optimierungslösungen wie beispielsweise den variablen Kühlerjalousien und deren positive Einflüsse auf den Luftwiderstandsbeiwert. Abschließend konnte vermerkt werden, dass die Verminderung selbigen Beiwertes um 0,01 bei einer Konstantfahrt von 150 km/h eine Kraftstoffersparnis von bis zu 0,15 l/100km mit sich bringt – die Effekte im Stadtverkehr sind mit nur ca. 0,01 l/100km weitaus geringer.

Im zweiten Hauptkapitel **Motorentchnik** ging es eingangs darum das Funktionsprinzip eines Verbrennungsmotors sowie wichtige Bauteile zu benennen und zu erläutern. Gleich im Anschluss wurde die Thematik des **Downsizings** betrachtet, technische Hintergründe und Möglichkeiten zur Umsetzung vorgestellt als auch Vor- und Nachteile diskutiert. Ein außerordentliches spannendes Kapitel folgte mit der **Turbotechnologie** – einem wichtigen Werkzeug des Downsizings. Dabei ging es vorerst darum das Wirkprinzip eines Turboladers sowie dessen konstruktiven Aufbau zu verstehen. Darauffolgend wurden verschiedene Einsatzstrategien wie beispielsweise die Aufladung mit mehreren Turboladern, die VTG Regelung sowie elektrische Turbolader betrachtet und abschließend die verschiedenen Vor- und Nachteile dargestellt. Im nächsten Teilkapitel **Direkteinspritzung** war es Aufgabe auf die technischen Grundlagen sowie das Funktionsprinzip einzugehen, den Vergleich zu Saugrohreinspritzsystemen zu ziehen, als auch Vor- und Nachteile aufzuzeigen. Abgeschlossen wurde das Thema der Motorentchnik mit der **Variablen Nockenwellenverstellung** sowie einer Anwendungsfunktion davon: der **Zylinderabschaltung**. In beiden Fällen wurden technische Hintergründe bearbeitet sowie Vor- als auch Nachteile angeführt. Durch Kombination der verschiedenen Downsizing Technologien wie der Turboaufladung, Direkteinspritzung, Variablen Nockenwellenverstellungen sowie Zylinderabschaltungen ergeben sich Kraftstoffeinsparungspotenziale von 10% bis 30% im Vergleich zu konventionellen Motorkonzepten. Wenn man die technischen Entwicklungen des Motorenbaus Revue passieren lässt, erkennt man, dass das Bestreben im Grunde genommen darin lag einen höchst-variablen Verbrennungsmotor zu schaffen, welche sich den jeweiligen Lastanforderungen anpassen, und somit mit größtmöglicher Effizienz arbeiten kann. Dies bedeutet auch, dass der heutige Verbrennungsmotor, als voll-variable Kraftmaschine, seinen Entwicklungshöhepunkt erreicht hat.

Das dritte und letzte Hauptkapitel **Hybride Antriebskonzepte** befasste sich mit der Frage wie alternative Antriebsmöglichkeiten in Form von Hybridantrieben mittels Elektromotoren aussehen können. Hierbei wurde die **geschichtliche Entwicklung** selbiger Systeme, als auch die verschiedenen **Konzepte** bzw. **Betriebsweisen** wie serielle, parallele oder leistungsverzweigte Hybride untersucht. Darauffolgend sind unterschiedlichen **Einsatzstrategien und Funktionsprinzipien** eben genannter Betriebsweisen vorgestellt worden um deren Bedeutung sowie Funktion im PKW verständlich hervorzuheben – dazu gehören die Begriffe wie z.B. das Boosten, Mild-Hybride oder Voll-Hybride. Bei den abschließenden Vor- und Nachteilen von Hybridantrieben wurde auch auf die nennenswerten Kraftstoffeinsparungspotenziale – 3% bis 6% bei Mikro-Hybriden, 10% bis 20% bei Mild-Hybriden sowie 30% bis 40% bei Voll-Hybridfahrzeugen - und somit der Daseinsberechtigung selbiger Systeme, hingewiesen.

Die nachstehende Tabelle zeigt übersichtlich die verschiedenen Einsparungspotenziale der vorgestellten Technologien.

Tabelle 4: Ergebnisse im Überblick

Technologie	Einsparungspotenzial	Bemerkungen
Leichtbau	Bis zu 0,35 l/100km pro 100 kg Gewichtseinsparung im Stadtverkehr. Nur ca. 0,07 l/100km bei 150 km/h Konstantfahrt.	Positiver Einfluss von Gewichtseinsparungen ist bei Konstantfahrten (z.B. Autobahnzyklen) kaum gegeben - bei Stadtzyklen hingegen maximal ausgeprägt.
Aerodynamik	Verringerung des $c_w$ -Wertes um -0,01 bewirkt bei einer Konstantfahrt mit 150 km/h Einsparungen bis zu 0,15 l/100km, im Stadtverkehr hingegen nur ca. 0,01 l/100km.	<p>Besonders großer Einfluss durch Fahrgeschwindigkeit. Im Stadtverkehr sind kaum Einsparungspotenziale gegeben.</p> <p>Kühlerjalousien:  <math>c_w</math>-Potenzial von -0,005 bis -0,018</p> <p>Unterbodenverkleidungen:  <math>c_w</math>-Potenzial von -0,005 bis -0,015</p> <p>Niveauregulierung:  <math>c_w</math>-Potenzial von -0,004 pro 10 mm Tieferlegung</p>
Downsizing	Einsparungspotenzial im Vergleich zu klassischen Motorkonzepten 10% bis 30%.	Downsizing wendet die vorgestellten Motortechnologien - bei gleichbleibenden Fahrleistungen - an um den Kraftstoffverbrauch zu senken.
Turbotechnologie	In Kombination mit Downsizing 10% bis 30% Einsparungspotenzial.	Instrument zur Mitteldruckerhöhung durch Einbringung von Ladedruck in den Brennraum.

Direkteinspritzung	Bietet ein Downsizingpotenzial von bis zu 40%; dies entspricht einer Kraftstoffeinsparung von rund 15% bis 19%.	Realisierung von vollvariablen Einspritzungsprozessen für möglichst geringen Verbrauch bei größtmöglicher Leistungsausbeute.
Variable Nockenwellenverstellungen	Verbrauchseinsparungen in Testzyklen liegen zwischen 5% und 10%.	Anpassung der Ventilbewegungen zur optimalen Verbrennung und Mitteldruckerhöhung. Dank der Integration von Variablen Ventiltrieben können auch Zylinderabschaltungen realisiert werden.
Zylinderabschaltung	Das Potenzial zur Verringerung des Kraftstoffverbrauches liegt hier bei rund 10%.	Durch noch intelligentere Betriebsstrategien könnten hier noch höhere Potenziale (bis 15%) erreicht werden z.B. Vernetzung Navigationssystem mit Motorsteuerung.
Mikro-Hybrid	3% bis 6% Kraftstoffverbrauchseinsparungen	Start-Stopp Einrichtungen, elektrische Unterstützung von Nebenaggregaten
Mild-Hybrid	10% bis 20% Kraftstoffverbrauchseinsparungen	< 20 kW elektrische Unterstützung des Antriebsstranges sowie Bremsenergieerückgewinnung möglich. Rein elektrische Fahrt nicht möglich.
Voll-Hybrid	30% bis 40% Kraftstoffverbrauchseinsparungen	Elektrische Antriebsleistungen i.d.R. >20 kW. Vollelektrisches Fahren möglich; weist alle Vorteile von Hybridsystemen auf.

Abschließend will der Verfasser festhalten, dass die dargestellten Technologien allesamt Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung von modernen PKWs sind – diese dürfen allerdings nicht als Allheilmittel zur Einsparung von Kraftstoff sowie Schadstoffen angesehen werden. Viel entscheidender ist das Verhalten am Lenkrad – denn der entscheidende Effizienztreiber aber auch -verhinderer in modernen Automobilen sitzt nach wie vor hinter dem Lenkrad! Eine Lösung hierfür könnten die Bestrebungen nach autonomen, miteinander vernetzten Fahrzeugen sein. Diese tauschen sich beispielsweise über aktuelle Verkehrssituationen wie Staubildungen aus, um daraus folgend eine möglichst effiziente, schadstoffarme Route zu wählen – solche spannenden Entwicklungen sind bereits im heutigen Fahrzeugbau, im Rahmen von immer fortschrittlicheren Assistenzsystemen, zu bezeugen.

### 3.2 Prognosen und Zukunftsvision

Die betrachteten konventionellen Mittel um Verbrennungsmotoren effizienter zu gestalten sind bereits in der Großserie integriert - der Verbrennungsmotor hat seinen Reifegrad erreicht. Somit stellt sich unweigerlich die Frage wie die zukünftigen Antriebstechnologien für PKWs aussehen könnten?

Der Autor denkt, dass der treibende Innovationsfaktor für neue Antriebstechnologien schlicht und ergreifend politische Vorgaben zur Einhaltung von Schadstoffgrenzen sind. Wären diese nicht gegeben so würde sich höchstwahrscheinlich kein Hersteller bemühen möglichst schadstoffarme Fahrzeuge zu produzieren – da dies selbstverständlich auch durch die notwendigen Entwicklungstätigkeiten den Überschuss mindern würde. Auch was die Erreichung der Schadstoffvorgaben angeht, ist uns mittlerweile klar geworden, dass es auch hier oftmals nicht so ehrlich zugeht wie man glauben mag – siehe Volkswagens Manipulation von Abgaswerten zur Einhaltung neuester Schadstoffnormen. Hier müssen seitens der Politik definitiv strikte Regeln und Vorschriften durchgesetzt werden - auch mit klar definierten Sanktionen bei Nichterfüllung - um auch für die Zukunft den Entwicklungsfortschritt der Automobilindustrie zu garantieren.

Aus heutiger Sicht kann man durchaus sagen, dass die bildlich gesprochene Schlinge um den Hals des Verbrennungsmotors immer enger geschnürt wird. Aktuell ist für die Automobilindustrie die erste Anlaufstelle, um auch weiterhin Schadstoffnormen erfüllen zu können, die Hybridtechnik. Fast jeder Hersteller forciert Hybridmodelle um neue Umweltauflagen zu erfüllen - aber auch im Sinne wirksamer Marketingstrategien damit das eigene Unternehmen mit Schlagwörtern wie Nachhaltigkeit, Umweltschutz oder schlicht dem „grün“-Sein assoziiert wird. Hierbei wird versucht den Verbrennungsmotor entweder auch weiterhin fest in den Antriebskonzepten zu verankern – parallele Hybride – oder den Verbrennungsmotor eher in die Rolle des Hilfsantriebes zur Reichweitensteigerung von Elektrofahrzeugen – Range Extender Prinzip serieller Hybride – zu drängen. Es muss ein Regelwerk geschaffen werden um gemeinsam das Ziel der Schadstoffreduktion zu erreichen. Klarerweise trifft das auf nicht viel Gegenliebe bei den Herstellern selbst, entstehen

durch die neuen, „aufgezwungenen“ Entwicklungsmaßnahmen hohe Kosten für die Großkonzerne. Allerdings ist hier nach Meinung des Verfassers das Ziel einer gesünderen Umwelt für den Planeten und Folgegenerationen über die Interessen einzelner Konzerne zu stellen.

Die Hybridtechnik kann also als Zwischenschritt zur Elektromobilität verstanden werden – was dessen Dasein zur Weiterentwicklung moderner Technologien berechtigt - wobei der endgültige Schritt dorthin noch große Hürden mit sich bringt. Aus Sicht des Autors wird sich die großflächige Elektromobilität erst dann durchsetzen, sobald die politischen Auflagen so streng werden, dass der Verbrennungsmotor nicht mehr wirtschaftlich sinnvoll angeboten werden kann, und somit seitens der Automobilindustrie vom Markt genommen wird – oder die Elektromobilität so stark staatlich subventioniert wird, dass der Anreiz für Endkunden konventionell betriebene PKW zu kaufen, verloren geht.

Hieraus resultieren allerdings mehrere Folgen und Fragestellungen für die Zukunft: Wenn Subventionen seitens des Staats fließen um den Kauf von Elektrofahrzeugen attraktiv zu gestalten, ist zu klären wie diese finanziert werden sollen. Umso gewichtiger wird diese Frage, wenn man bedenkt, dass bei geringerem Aufkommen von konventionellen und Hybridfahrzeugen die Kfz-Steuereinnahmen drastisch sinken werden und so die Einnahmen für den Staat sinken – im Jahr 2016 betrugen selbige aus der Kfz-Steuer in Deutschland rund 9 Mrd. Euro. Hinzu kommen noch jene aus der Energiesteuer (früher Mineralölsteuer) mit knapp 40,1 Mrd. Euro.<sup>86</sup> Die Frage bleibt also, ob der zusätzliche Stromverbrauch von Elektrofahrzeugen, welcher über die Stromsteuer besteuert wird, dieses Defizit kompensieren kann. Nicht vernachlässigbar sind ebenso die noch notwendigen Investitionen in die Strominfrastruktur in Bezug auf Ladestationen, Anbindungen an das Stromnetz sowie Abdeckung des gesteigerten Stromverbrauches.

Aber was passiert mit der Industrie, wenn der Verbrennungsmotor schlussendlich stirbt? Denkt man alleine beispielsweise an die riesigen Wirtschaftssektoren der Treibstoffherstellung und -bereitstellung mit seinen dichten Tankstellennetzen, welche, ohne Verbrennungsmotoren, quasi überflüssig wäre, wird einem schnell das Ausmaß des Strukturwandels, welcher mit der zukünftigen Elektromobilität einher gehen wird, bewusst. Selbiger Industriezweig wird sich früher oder später auch auf den Wandel im Automobilsektor gefasst machen müssen – umsatteln auf Stromtankstellen, ist das möglich? Ebenso die gigantische Zulieferindustrie wie Motorenhersteller, Getriebehersteller, Zulieferer für Betriebsflüssigkeiten, Lohnfertiger usw. müssen ihre zukünftige Unternehmensstrategie nochmals gründlich überdenken. Es wird einem bewusst, dass der unweigerliche Schritt hin zur Elektromobilität schwerwiegende Auswirkungen für etablierte Industriezweige mit

---

<sup>86</sup> Vgl. [destatis.de](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Umweltschutzmassnahmen/Aktuell.html): 58,0 Milliarden Euro umweltbezogene Steuereinnahmen für das Jahr 2016, <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Umweltschutzmassnahmen/Aktuell.html> [Zugriff: 18.03.2018]

sich bringen wird. Aber nicht nur die Zulieferer wären betroffen – auch die Automobilhersteller selbst stünden plötzlich vor mehreren Problemen. Wozu braucht ein Autohaus noch eine große und fachlich breit gefächerte Werkstatt? Ein Elektrofahrzeug ist weitaus weniger serviceintensiv als ein konventioneller PKW. Woher kommen die entgangenen Margen aus dem Servicegeschäft? Wohin mit den überflüssigen Angestellten in der Produktion? Wie strukturiert man die riesigen Montagehallen der Hersteller auf Elektromobilität um? Man könnte nun ebenso schnell antworten, dass dies das Problem der Automobilindustrie sei. Doch umgekehrt darf man hier nicht vergessen, dass die überschüssigen Werkstattmitarbeiter, Monteure, Motorenbauer, Tankstellenbetreiber, Lohnfertiger usw. aus jetziger Sicht ihren Job verlieren werden. Spätestens dann ist es ein volkswirtschaftliches Problem – die Flut an Arbeitslosen wird durch den staatlichen Haushalt gestützt werden müssen. Laut einer Studie des Münchner Ifo-Institutes aus 2017 wären alleine in Deutschland durch das Aus des Verbrennungsmotors rund 620.000 Jobs betroffen. Umgelegt auf die Brutto-Wertschöpfung Deutschlands gesamten Industriesektors würde dies einen Einbruch von 13% bedeuten – oder umgerechnet 48 Mrd. Euro.<sup>87</sup> Auch diese Zahlen lassen die enormen Ausmaße, welche das Aus des Verbrennungsmotors mit sich bringen wird, erkennen. Aber nicht nur wirtschaftliche, sondern auch umwelttechnische Fragen - z.B. wie soll das Recyclingsystem für die Batterien der Elektrofahrzeuge aussehen - bleiben noch unbeantwortet.

Es sieht also so aus als müsste schlussendlich eine Entscheidung zwischen Umweltschutz oder der möglichen Zerschlagung ganzer Industriesektoren sowie fehlenden Staatseinnahmen getroffen werden. Es ist aber vorerst noch zu klären ob die Elektromobilität überhaupt positive Auswirkungen für die Umwelt hat – bekanntlicherweise schafft auch die Stromerzeugung Schadstoffe. Wie die Bilanz tatsächlich aussieht, das soll abschließend noch kurz zusammengefasst sein:

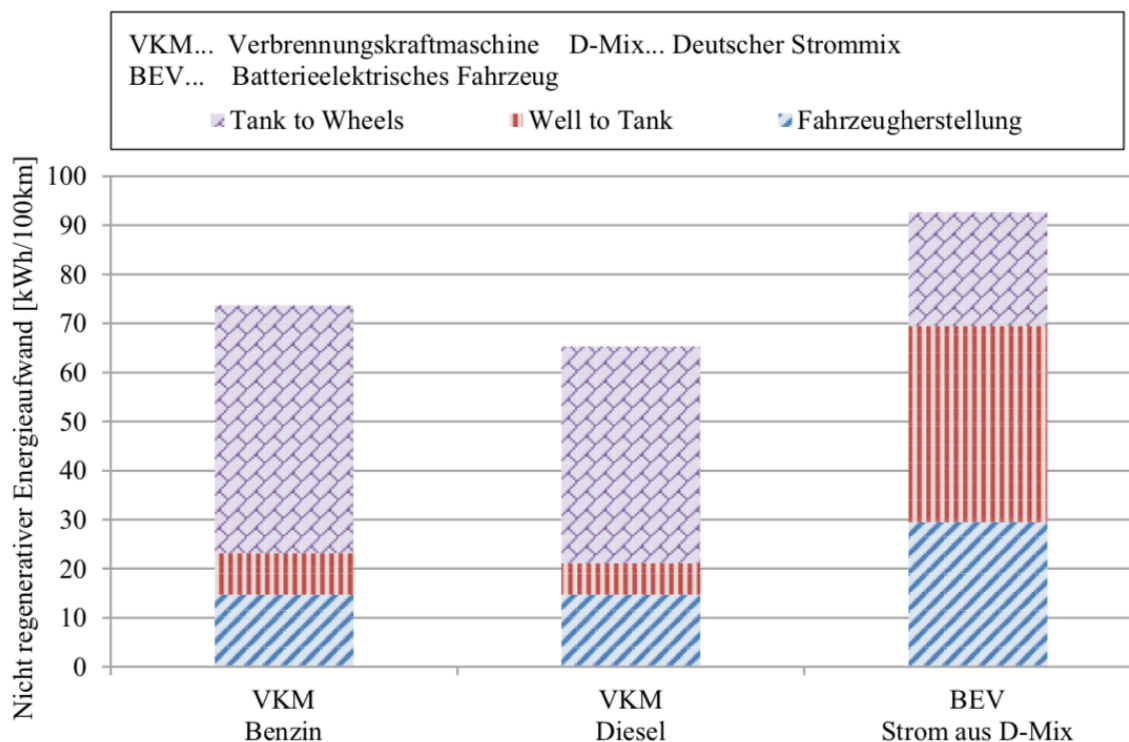
Was den Schadstoffausstoß im Betrieb betrifft, ist ein Elektrofahrzeug selbstredend Hybridfahrzeugen, sowie konventionell betriebenen PKW, überlegen, da es keine Emissionen an sich produziert. Das klingt im ersten Moment sehr verlockend – allerdings darf nicht vergessen werden, dass der Strom, der das Fahrzeug schlussendlich antreibt, in irgendeiner Form „hergestellt“ werden muss. Dafür gibt es verschiedenste Methoden - unter anderem durch Kohle-, Atom-, Gas-, Wasser- oder beispielsweise auch Windkraftwerke. Daraus lässt sich weiters schlussfolgern, dass im Endeffekt die Stromherkunft für die Schadstoffemissionen eines Elektrofahrzeuges entscheidend ist. Dies würde ebenso be-

---

<sup>87</sup> Vgl. Welt.de: Vetter, P.: Verbot von Verbrennungsmotoren gefährdet 620.000 Jobs: Die deutsche Autobranche und das Ifo-Institut warnen vor einem Verbot des Verbrennungsmotors (Stand: 18.07.2017), <https://www.welt.de/wirtschaft/article166746851/Verbot-von-Verbrennungsmotoren-gefaehrdet-620-000-Jobs.html> [Zugriff: 15.03.2018]

deuten, dass regenerative Energiequellen wie Sonnenenergie, Wasserkraft, Biomasse, Erdwärme oder Windenergie hier zu bevorzugen sind um den Schadstoffausstoß so gering wie möglich zu halten – doch wie hoch sind die Einflüsse in der Praxis?

In der Folgeabbildung sind die nicht regenerativen Energieaufwände pro 100 km Fahrstrecke eines Mittelklasse PKW dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass bei der Herstellung von Diesel- sowie Benzin-PKW fast gleich viel an nicht erneuerbarer Energie verbraucht wird – bei Elektrofahrzeugen hingegen liegt dieser Wert im Vergleich annähernd beim Doppelten. Ebenso eingezeichnet ist der Energiebedarf für die Herstellung von Benzin- und Dieseltreibstoff selbst (Well to Tank – rot strichliert) – wobei auch hier verdeutlicht wird, dass die Elektrizitätsherstellung in Deutschland rund das fünf- bis sechsfache an Energieaufwand verschlingt. Abschließend ist noch in violett der Energiebedarf im Betrieb (Tank to Wheels) festgehalten, welcher beim Elektrofahrzeug rund die Hälfte im Vergleich zu Benzin- und Dieselmotoren beträgt. Bereits hier lässt sich erkennen, dass das Elektrofahrzeug an sich nicht unbedingt die Lösung des Schadstoffproblems ist.<sup>88</sup>



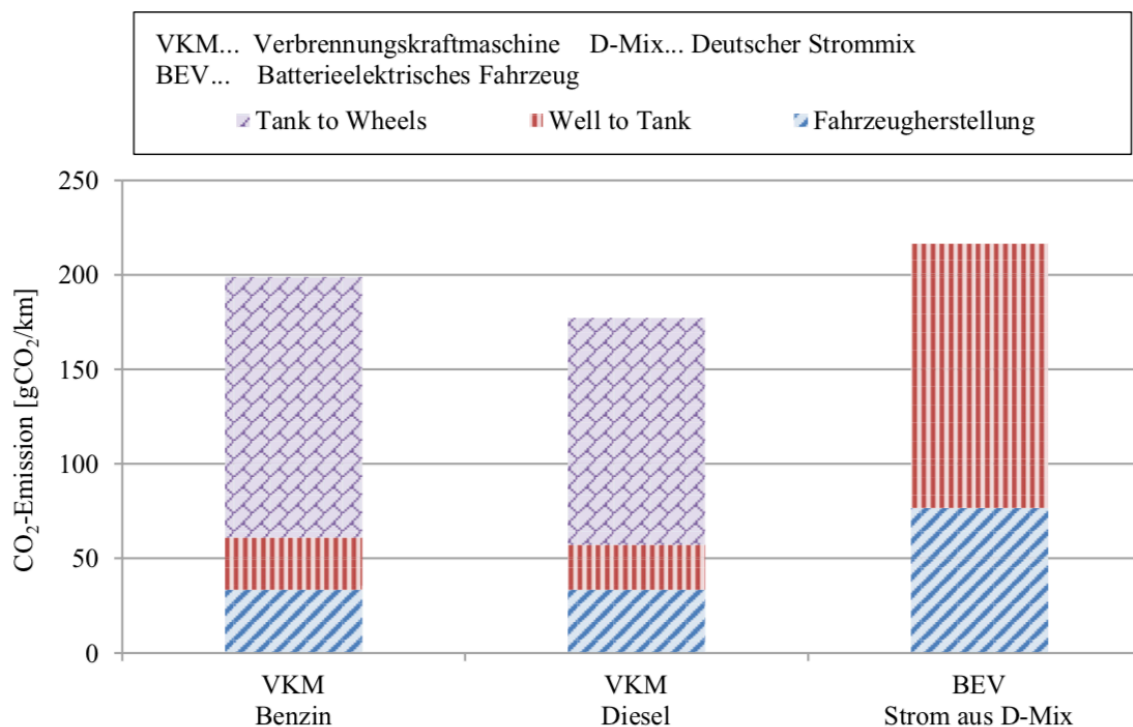
**Abbildung 30: Nicht-regenerativer Energieaufwand eines Mittelklasse PKW<sup>89</sup>**

<sup>88</sup> Vgl. Lenz, H.-P. (Hrsg.), Tober, W.: Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor: Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 15f

<sup>89</sup> Bildquelle: Lenz, H.-P. (Hrsg.), Tober, W.: Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor: Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 16



Noch anschaulicher ist selbiger Vergleich, wenn es um die Schadstoffemissionen, insbesondere CO<sub>2</sub>, der Fahrzeuge - bezogen auf die gesamte Fahrzeugbetriebsdauer - geht. Hierbei lässt sich in Abb. 31, ähnlich wie oben, erkennen, dass rund die doppelten Kohlendioxidemissionen durch den niedrigen regenerativen Energieanteil in der Elektrofahrzeugherstellung entstehen. Bei der Elektrizitätserzeugung (Well to Tank) entstehen beim deutschen Strommix, im Vergleich zu Diesel und Benzin, rund sechs- bis siebenmal höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen. Wenn man die Summe an Kohlendioxidemissionen des gesamten Lebensweges der verschiedenen Antriebskonzepte betrachtet, schneidet die Elektromobilität, aufgrund des deutschen Strommixes, schlechter als Diesel- oder Benzinfahrzeuge - obwohl Elektrofahrzeuge im Betrieb selbst emissionsfrei sind - ab.<sup>90</sup>



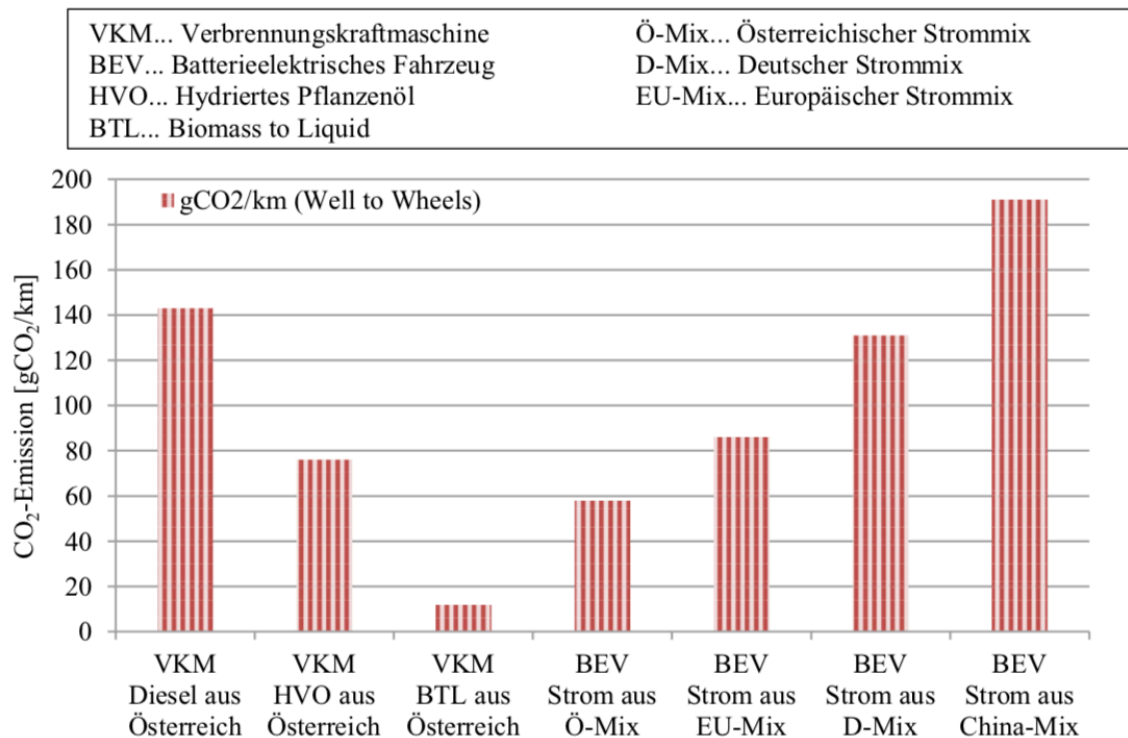
**Abbildung 31: Lebensweganalyse der CO<sub>2</sub> Emissionen eines Mittelklasse PKW<sup>91</sup>**

Um einen Vergleich unterschiedlicher Treibstoffe, sowie Regionen darzustellen, wurde die nachstehende Abbildung eingefügt. Diese zeigt die Kohlendioxidemissionen eines Mittelklassefahrzeuges entlang des gesamten Lebensweges – um die Bilanz für Strombetriebene Fahrzeuge nicht zusätzlich zu verschlechtern, wurde diesmal die Fahrzeugherstellung ausgeblendet und nur die Schadstoffemission von der Treibstoffherstellung und dem

<sup>90</sup> Vgl. Lenz, H.-P. (Hrsg.), Tober, W.: Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor: Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 16f

<sup>91</sup> Bildquelle: Lenz, H.-P. (Hrsg.), Tober, W.: Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor: Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 17

Betrieb veranschaulicht (Well to Wheels). Ersichtlich sind hier die geringen Emissionswerte des Strommixes aus Österreich – dies beruht auf dem sehr hohen regenerativen Anteil (67%) des Gesamtstromanteiles in Österreich. Nur letzterer, pflanzliche Treibstoffe sowie Biomassetreibstoffe können die Marke von 100g Kohlendioxid pro km unterbieten. Somit ist sehr deutlich veranschaulicht, welchen immensen Einfluss die Stromherkunft und Art der Erzeugung mit sich führen.<sup>92</sup>



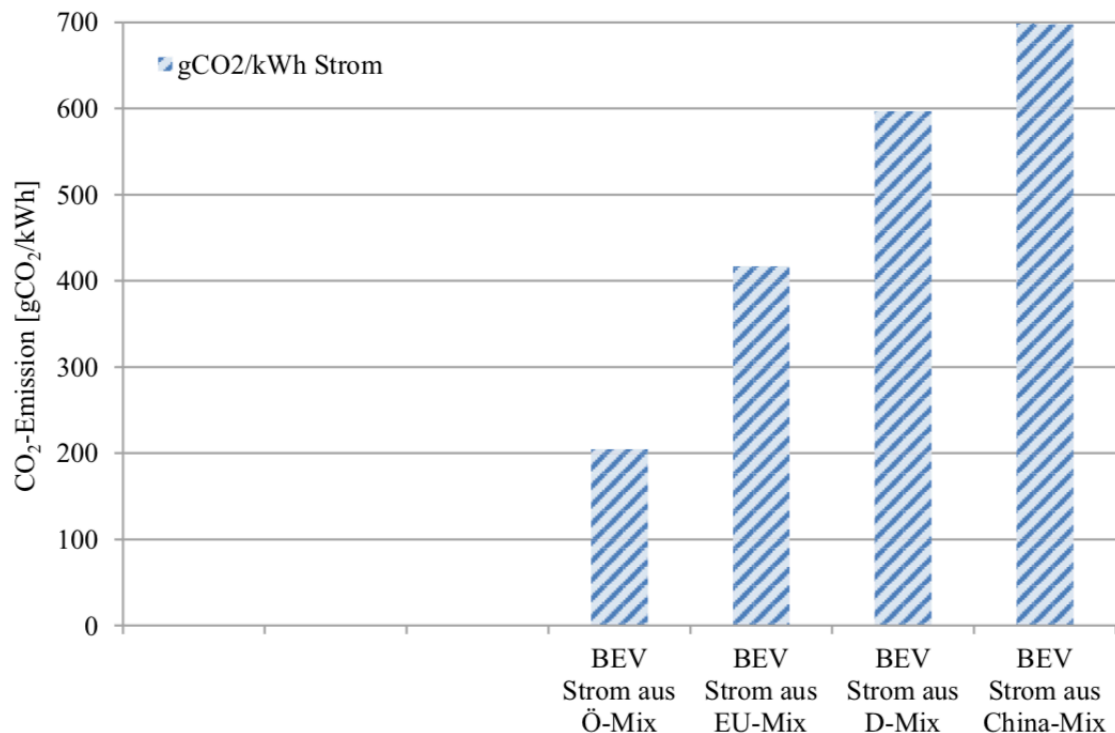
**Abbildung 32: Lebensweganalyse der CO<sub>2</sub> Emissionen eines Mittelklasse PKW im Vergleich<sup>93</sup>**

Es lässt sich also schlussfolgern: Elektromobilität macht durchaus Sinn, der Verbrennungsmotor hat seinen technologischen Höhepunkt erreicht, gesetzliche Vorschriften zwingen die Hersteller zu hybriden Lösungen. Früher oder später wird sich die Elektromobilität durchsetzen und ein neues Zeitalter der Mobilität einläuten. Die Entwicklungsschritte dorthin geschehen alle unter dem Leitsatz der Schadstoffminimierung – allerdings haben die vorhergehenden Grafiken klargemacht, dass das Elektroauto alleine nicht unbedingt eine „saubere Lösung“ ist. Im Betrieb sind diese emissionsfrei – doch der Weg bis zum Betrieb, also die Stromerzeugung, ist global gesehen noch eine recht „schmutzige

<sup>92</sup> Vgl. Lenz, H.-P. (Hrsg.), Tober, W.: Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor: Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 18f

<sup>93</sup> Bildquelle: Lenz, H.-P. (Hrsg.), Tober, W.: Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor: Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 19

Angelegenheit“. Die abschließende Übersicht über CO<sub>2</sub> Emissionswerte bei der Stromerzeugung verschiedener Länder verstärkt diese Behauptung nochmals:



**Abbildung 33: CO<sub>2</sub> Emissionen bei der Stromerzeugung verschiedener Länder<sup>94</sup>**

Als Abschluss bleibt nur noch eines zu sagen: Der Verbrennungsmotor hat über rund 130 Jahre hinweg hervorragende Dienste geleistet und hat in vielerlei Hinsicht zum Fortschritt der Zivilisation sowie Wirtschaft beigetragen.

Doch nun ist es an der Zeit den nächsten Schritt zu wagen – den Schritt hin zum voll-elektrifizierten PKW. Dieser soll mitwirken die Umwelt für Folgegenerationen zu schützen als auch zu erhalten – allerdings kann dies nur dann geschehen, wenn es gelingt global auf regenerative Energieformen umzusatteln und so die Schadstoffemissionen bei der Stromerzeugung langfristig zu senken. Somit wäre schlussendlich nicht nur der Transportsektor – mit 24% zweitgrößter Verursacher der globalen CO<sub>2</sub> Emissionen - positiv beeinflusst, sondern auch die Energieerzeugungssparte welche, wie in der Einleitung aufgezeigt, rund 42% der globalen CO<sub>2</sub> Emissionen verantwortet.

Sind diese Kriterien erfüllt, wird es gelingen aus dem Thema Mobilität eine „saubere Sache“ zu machen!

<sup>94</sup> Bildquelle: Lenz, H.-P. (Hrsg.), Tober, W.: Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor: Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 20

## Literatur

**Böge, A. (2009)**

Technische Mechanik: Statik – Dynamik – Fluidmechanik – Festigkeitslehre, 28. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009

**Böge, A., Böge, W. (Hrsg.) (2017)**

Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 23. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017

**Braess, H., Seiffert, U. (Hrsg.) (2011)**

Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 6. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011

**Friedrich, H. (Hrsg.) (2017)**

Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017

**Goldmann, D., Martens, H. (2016)**

Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016

**Golloch, R. (2005)**

Downsizing bei Verbrennungsmotoren: Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung, Berlin: Springer, 2005

**Gruden, D. (2008)**

Umweltschutz in der Automobilindustrie: Motor, Kraftstoffe, Recycling, 1. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008

**Hering, E., Martin, R., Stohrer, M. (2016)**

Physik für Ingenieure, 12. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2016

**Lenz, H.-P. (Hrsg.), Tober, W. (2016)**

Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor: Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016

**MAHLE GmbH (Hrsg.) (2013)**

Ventiltrieb: Systeme und Komponenten, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013

**Merker, G., Teichmann, R. (Hrsg.) (2014)**

Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise – Simulation – Messtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014

**Pischinger, S., Seiffert, U. (Hrsg.) (2016)**

Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016

**Reif, K. (Hrsg.) (2015)**

Ottomotor–Management im Überblick, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015

**Reif, K., Noreikat, K., Borgeest, K. (Hrsg.) (2012)**

Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012

**Schramm, D., Koppers, M. (2014)**

Das Automobil im Jahr 2025: Vielfalt der Antriebstechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014

**Schreiner, K. (2015)**

Basiswissen Verbrennungsmotor: Fragen – Rechnen – Verstehen – Bestehen, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015

**Schreiner, K. (2017)**

Verbrennungsmotor – kurz und bündig, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017

**Schütz, T. (Hrsg.) (2013)**

Hucho – Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik – Wärmetechnik – Fahrodynamik – Komfort, 6. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013

**Schütz, T. (2016)**

Fahrzeugaerodynamik: Basiswissen für das Studium, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016

**Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.) (2014)**

Leichtbautechnologien im Automobilbau: Werkstoffe – Fertigung - Konzepte, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014

**Stan, C. (2015)**

Alternative Antriebe für Automobile: Hybridsysteme – Brennstoffzellen – alternative Energieträger, 4. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2015

**Trzesniowski, M. (2014)**

Rennwagentechnik: Grundlagen – Konstruktion – Komponenten – Systeme, 4. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014

**Tschöke, H. (Hrsg.) (2015)**

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015

**Van Basshuysen, R. (2010)**

Fahrzeugentwicklung im Wandel: Gedanken und Visionen im Spiegel der Zeit, 1. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010

**Van Basshuysen, R., Schäfer, F. (Hrsg.) (2017)**

Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen – Komponenten – Systeme – Perspektiven, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017

**Van Basshuysen, R. (Hrsg.) (2013)**

Ottomotor mit Direkteinspritzung: Verfahren – Systeme – Entwicklung – Potenzial, 3. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013

**Van Basshuysen, R. (Hrsg.) (2017)**

Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung: Ottokraftstoffe – Erdgas – Methan – Wasserstoff, 4. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017

Internetquellen:**Audi-Technology-Portal.de**

Audi Space Frame, <https://www.audi-technology-portal.de/de/karosserie/aluminiumkarosserien/audi-space-frame-asf> [Zugriff: 20.02.2018]

**bayern-innovativ.de**

Stauber, R.: Werkstoffe im Automobilbau – Anforderungen und Trends: Cluster „Neue Werkstoffe“ in Bayern (26.10.2006), S. 5, [http://www.bayern-innovativ.de/stauber\\_Vortrag](http://www.bayern-innovativ.de/stauber_Vortrag) [Zugriff: 20.02.2018]

**bmf.gv.at (Bundesministerium für Finanzen Österreich)**

Motorbezogene Versicherungssteuer,  
[https://www.bmf.gv.at/steuern/fahrzeuge/motorbezogene-versicherungssteuer.html#Gegenstand\\_der\\_Steuer](https://www.bmf.gv.at/steuern/fahrzeuge/motorbezogene-versicherungssteuer.html#Gegenstand_der_Steuer) [Zugriff: 12.02.2018]

**BMW.at**

BMW 7er Limousine: Ein elektrisierendes Fahrgefühl – Der BMW 740e Plug-in-Hybrid,  
<https://www.bmw.at/de/all-models/7-series/sedan/2015/iperformance.html> [Zugriff: 26.02.2018]

**BMW.at**

Technische Daten: i8, <https://www.bmw.at/de/all-models/bmw-i/i8-coupe/2017/technische-daten.html#tab-0> [Zugriff: 26.02.2018]

**destatis.de (Statistisches Bundesamt)**

58,0 Milliarden Euro umweltbezogene Steuereinnahmen für das Jahr 2016,  
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomieGesamtrechnungen/Umweltschutzmassnahmen/Aktuell.html> [Zugriff: 18.03.2018]



**Statista.de**

Verteilung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit nach Sektor im Jahr 2015, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167957/umfrage/verteilung-der-co-emissionen-weltweit-nach-bereich/> [Zugriff: 08.02.2018]

**tu-braunschweig.de**

Müller, R.: Soll man Autos aus Aluminium bauen? :Ein Beispiel für „Fermi-Probleme“ in der Schule, <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/aluminiumautos.pdf> [Zugriff: 20.02.2018]

**Vcd.org (VCD Verkehrsclub Deutschland e.V.)**

EU setzt Vorgaben für PKW, <https://www.vcd.org/themen/auto-umwelt/co2-grenzwert/> [Zugriff: 12.02.2018]

**Welt.de**

Vetter, P.: Verbot von Verbrennungsmotoren gefährdet 620.000 Jobs: Die deutsche Autobranche und das Ifo-Institut warnen vor einem Verbot des Verbrennungsmotors (Stand: 18.07.2017), <https://www.welt.de/wirtschaft/article166746851/Verbot-von-Verbrennungsmotoren-gefaehrdet-620-000-Jobs.html> [Zugriff: 15.03.2018]

**Wirtschaftslexikon24.com**

Transport, <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/transport/transport.htm> [Zugriff: 12.02.2018]

**Zeit.de**

Weltweiter CO<sub>2</sub>-Ausstoß steigt wieder: Noch im vergangenen Jahr hielten Forscher eine Trendwende beim Ausstoß von Kohlendioxid für möglich. Doch 2017 bringt Ernüchterung (Stand: 13.11.2017), <http://www.zeit.de/wissen/umwelt/2017-11/co2-ausstoss-anstieg-klimawandel-fossile-brennstoffe-global-carbon-project?print> [Zugriff: 12.02.2018]

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Fulpmes, den

Simon Johann Munter